



TITLE:

変圧器を中心とする送配電線の過渡特性(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

小南, 光夫

CITATION:

小南, 光夫. 変圧器を中心とする送配電線の過渡特性. 京都大学, 1962, 工学博士

ISSUE DATE:

1962-03-31

URL:

<https://doi.org/10.14989/161934>

RIGHT:

変圧器を中心とする
送配電線の過渡特性

昭和36年9月

小 南 光 夫

変圧器を中心とする送配電線の過渡特性

昭和 36 年 9 月

小 南 光 夫

DOC
1961
25
電気系

目 次

	頁
内 容 梗 概	1
使用記号一覧表	3
第1章 変圧器の過渡特性	6
第1節 緒 言	6
第2節 変圧器のインデイシャルインピーダンス	7
(1) 変圧器のインデイシャルインピーダンスの実測値とその 等価回路	7
(2) 変圧器のインピーダンス・オリログラムに対する考察	17
第3節 変圧器の内部電位振動とインデイシャルインピーダン スの関連性	22
(1) 変圧器の内部電位振動に対する考察と、そのインデイ シャルインピーダンスとの関連性	22
(2) 2群に分けて考え得る変圧器巻線の振動	34
第4節 変圧器巻線単位コイルのインデイシャルインピーダンス	41
(1) 変圧器巻線の端子インピーダンス	41
(2) 変圧器巻線の各単位コイル間の結合	44
(3) 変圧器巻線の等価回路	49
第5節 結 言	52
第2章 変圧器を接続した模擬送電線の過渡特性	54
第1節 緒 言	54
第2節 模擬送電線および変圧器の過渡特性	56
(1) 模擬送電線の過渡特性	56
(2) 変圧器の過渡特性	59
第3節 模擬送電線の終端に変圧器を接続した場合の過渡特性	60
(1) 模擬送電線の終端に10 KVA変圧器を接続した場合の過渡 特性	60

(2) 模擬送電線の終端に150KVA変圧器を接続した場合の過渡特性	66
第4節 模擬送電線終端に接続する変圧器(10KVA)の数あるいは模擬送電線の長さを変化した場合の過渡特性	70
(1) 模擬送電線終端に接続する変圧器の数を变化した場合の過渡特性	70
(2) 終端に10KVA単相変圧器を接続した模擬送電線の長さを変えた場合の過渡特性	71
第5節 模擬送電線の途中に変圧器を接続した場合の過渡特性	74
(1) 模擬送電線の中央に変圧器を接続した場合の過渡特性	74
(2) 模擬送電線の途中に変圧器が分布している場合の過渡特性	79
第6節 変圧器の等価回路を接続した模擬送電線の過渡特性	84
(1) 変圧器の等価回路を静電容量として模擬送電線に接続した場合の過渡特性	84
(2) 変圧器の等価回路をL,R,Cの並列回路として模擬送電線に接続した場合の過渡特性	84
第7節 模擬送電線に変圧器を接続した場合の矩形波電流印加と標準衝電圧($1 \times 30 \mu s$)印加とによる過渡特性の比較	88
第8節 変圧器を接続した模擬送電線の減衰振動に対する特性	90
第9節 結 言	97
第3章 送配電線の進行波特性	99
第1節 緒 言	99
第2節 第2京大法による送配電線のインデイヤル・インピータンスの測定オシログラム	101
第3節 送配電線のインピータンス・オシログラムより計算した線路常数	117

(1)	インピーダンス・オシログラムより計算して得られる線路 常数	117
(2)	線路構造より計算して得られる線路常数	117
第4節	インデイヤル・インピーダンスの実測値より誘導され る他のインピーダンス	123
第5節	インピーダンス・オシログラム上の反射波	125
(1)	終端開放せる単純な配電線	125
(2)	終端抵抗接地された単純な配電線	131
(3)	途中に単相変圧器のある終端開放せる単純な配電線	134
(4)	途中に単相変圧器のある終端抵抗接地せる単純な配電線	134
(5)	分岐1個のみある送電線	135
(6)	小数の分岐をもった配電線	137
(7)	複雑なる分岐のある配電線	140
第6節	環状に接続した3KV配電線における減衰および変歪の 実測	144
第7節	配電線上の衝撃電圧の減衰の実測	149
(1)	変電所母線に衝撃電圧を印加し、線路途中で電圧を測定 した場合の実測	149
(2)	線路途中に衝撃電圧を印加し、変電所母線で電圧を測定 した場合の実測	151
(3)	減衰係数およびこれに対する考察	154
第8節	3KV配電線の絶縁抵抗の実測	159
第9節	結 言	161
総括		164
文献		

内 容 梗 概

送電系統、配電系統を雷あるいは開閉サージ等異常電圧より防護するためその過渡特性、進行波特性の研究が幾多の人々によって行われてきたが、多くの場合送電線単独^{(12)~(18)}あるいは変圧器単独^{(19)~(37)}に過渡特性が検討される場合が多かった。

本研究は変圧器を送電線に接続した場合の過渡特性を知るために変圧器単独の過渡特性を求め、その等価回路を明らかにし、次いでその変圧器を模擬送電線に接続したものについて進行波特性を検討した。さらに実際の営業送電線および配電線の進行波現象を実測し、変圧器あるいは分岐線の進行波特性に対する影響を検討した。

その研究の手段としては京都大学林重憲教授の創始された第2京大法によりインデイシャル・インピーダンスを測定すると同時に、必要な場合は系統各部にあらわれる電圧を実測することにより伝達インピーダンスを求め、変圧器および送配電系統の過渡特性を検討した。

まず第1章では代表的な変圧器

- 1) 10 KVA 6KV/210V 単相配電用巻鉄心変圧器
- 2) 150 KVA 6KV/3KV 単相外鉄型絶縁変圧器
- 3) 500 KVA 30KV/3KV 単相外鉄型電力用変圧器
- 4) 10,000 KVA 30KV Δ /6KV Δ 3相内鉄型電力用変圧器

について各種接続に対して第2京大法によりインデイシャル・インピーダンスを求め、その過渡現象に対する等価回路を明らかにした。

また上記変圧器の内部電位振動を測定し、それとインデイシャル・インピーダンスとの関係を考察した。

さらに 50 KVA 3KV/210V 単相配電用内鉄型積鉄心変圧器について、その1次巻線全体のインデイシャル・インピーダンス、1次巻線片脚のみのインデイシャル・インピーダンスを測定し、また1次巻線を構成する6つの単位コイルに分割し、それぞれ自己のインデイシャル・インピーダンス、およびその測定時に他の単位コイルにあらわれる伝達電圧を測定し、各回路定数を検討し等

価回路を求め、これにより初期電位分布を実測値と比較した。

次に第2章では、第1章の変圧器中10KVA配電用変圧器、あるいは150KVA絶縁変圧器を伝播時間 $8\mu s$ の模擬送電線に接続して、第2京大法によりインデシヤル・インピーダンスを測定し、同時にこの場合の他の部分にあらわれる電圧、すなわち伝達インピーダンスを測定し、その過渡特性を検討した。

またこの場合模擬送電線に接続する変圧器の個数をかえたとき、および模擬送電線の長さを変化した場合の進行波特性をも検討した。

第3章では実際の営業用送電線および配電線について、線路のみ、分岐線が1つある送電線、変圧器が1個ある配電線、少数の分岐線および変圧器のある配電線、分岐線および変圧器の分布が複雑なる配電線等のインデシヤル・インピーダンスを測定し、また環状に接続して始端および終端を変電所においた配電線でかつ分岐および変圧器が複雑に分布しているもののインデシヤル・インピーダンス、およびその場合終端にあらわれる電圧を測定して進行波特性を検討した。また以上の場合進行波を第1種進行波および第2種進行波に分解して列々に進行波特性を検討すべきことを示した。

また配電線に、変電所母線より衝垂電圧を加えて配電線途中数ヶ所における電圧をクリドノグラフおよび波高電圧計により測定し、あるいは逆に、配電線途中より衝垂電圧を加えて変電所母線における電圧を高速度ブラウン管により測定して、配電線中の衝垂波の減衰を検討した。

以上の如く本研究では第2京大法により変圧器単独の過渡特性、模擬送電線と変圧器を接続したものの過渡特性および実際の送配電線の進行波特性を検討して明らかにした。

使用記号一覧表

A	インピーダンスの大きさを示す係数	
a	反射係数	
b	透過係数	
C	静電容量	F
C _i	侵入容量	F
C _t	変圧器等価回路の並列静電容量	F
C _u	線路単位長の静電容量 $C_u = \frac{1}{Zv}$	$\mu F/km, pF/km$
C ₀	線路全体の静電容量	F
c	反射係数	
E	印加電圧	V
e	電圧進行波	
$e_{(2n+1)T}$	線路の印加端より (n+1) 回目に線路の方へ進む電圧進行波	
f	周波数	C/s
H(x)	単位関数	
h	線路導体の地上高さ	m
L	インダクタンス	H
L _t	変圧器等価回路の並列インダクタンス	H
L _u	線路単位長のインダクタンス $L_u = \frac{Z}{v}$	$mH/km, \mu H/cm$
ℓ	線路上の伝播距離	km
p	微分演算子記号	
R	抵抗	Ω
R _m	第2京大法の矩形電流印加用直列抵抗	Ω
R _s	第2京大法の比較用標準抵抗	Ω
R _t	変圧器等価回路の並列抵抗	Ω
R _u	線路単位長の抵抗	Ω/km
R ₀	線路全体の抵抗	Ω
r	線路導体の半径	cm

T	線路の伝播時間	μs
t	時間	s
v	進行波の伝播速度	$m/\mu s$
$\left. \begin{array}{l} v_a \\ v_b \\ v_c \end{array} \right\}$	3相線路それぞれの線上の進行波電圧	V
$\left. \begin{array}{l} v_{ar1} \\ v_{br1} \\ v_{cr1} \end{array} \right\}$	3相線路それぞれの線上で印加端へ戻つて来る第1回目の反射波電圧	V
$\left. \begin{array}{l} v_{as2} \\ v_{bs2} \\ v_{cs2} \end{array} \right\}$	3相線路それぞれの線上で印加端より線路の方へ進む2回目の進行波電圧	V
v_0	3相線路上の第2種進行波電圧	V
$\left. \begin{array}{l} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{array} \right\}$	3相線路それぞれの線上の第1種進行波電圧	V
v_{0s2}	印加端より線路の方へ進む2回目の第2種進行波電圧	V
$\left. \begin{array}{l} v_{1s2} \\ v_{2s2} \\ v_{3s2} \end{array} \right\}$	3相線路それぞれの線上の印加端より線路の方へ進む2回目の第1種進行波電圧	V
$Z(p)$	p 関数であらわしたインピーダンス	Ω
$Z(t)$	t 関数であらわしたインピーダンス	Ω
$Z_{a(1)}$	線路の1線対接地他線および大地間のサージインピーダンス	Ω
$Z_{a(2)}$	線路の3線一括対大地間のサージインピーダンス	Ω
$Z_{a(3)}$	線路の1線対大地間(他線非接地)のサージインピーダンス	Ω
Z_m	線路導体間の相互サージインピーダンス	Ω
Z_x	未知のインピーダンス	Ω
Z_0	線路の零相インピーダンス	Ω
Z_1	線路の正相インピーダンス	Ω

Z_2	線路の逆相インピーダンス	Ω
Z	線路のサージインピーダンス	Ω
z	線路の各導体の自己インピーダンス	Ω
z'	線路の各導体間の相互インピーダンス	Ω
α	指数減衰係数	
α_1	指数減衰係数	
α_2	指数減衰係数	
β	位相係数 ($\beta^2 = \omega^2 + \alpha^2$ であらわされる数)	
δ	コイル大地間静電容量	F
δ	コイル相互間静電容量	F
ξ	対地静電容量をもつコイル	
ζ	コイル相互間静電容量のみをもつコイル	
τ	振動周期	μs
ω	振動の角速度 $\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{1}{T}$	rad/s

第1章 変圧器の過渡特性

第1節 緒言

変圧器の接続されている送配電線の過渡特性を検討するにあたって、まず変圧器自身の過渡特性を知っておく必要がある。変圧器の過渡特性としては、変圧器を外部よりみたインデイヤル・インピーダンス、および変圧器内部の現象すなわち内部電位振動に分けて考える。

前者は変圧器外部よりその端子をみたインピーダンス、すなわち2端子回路としてみたインピーダンスである。すなわち変圧器を送電線と接続した場合の送電線上あるいは変圧器端子の過渡現象等については、これを使用して検討解析すればよい。代表的な変圧器の2・3の例について巻線端子よりみたインデイヤル・インピーダンスを、第2京大法により測定しかつその等価回路を求め、第2章で変圧器を接続した模擬送電線の過渡特性を検討する基礎資料とした。またそのインデイヤル・インピーダンスの性質を検討した。

第2に変圧器の内部振動をその過渡特性の観測より検討し、また内部電位振動とインデイヤル・インピーダンスとの関連性を考察した。

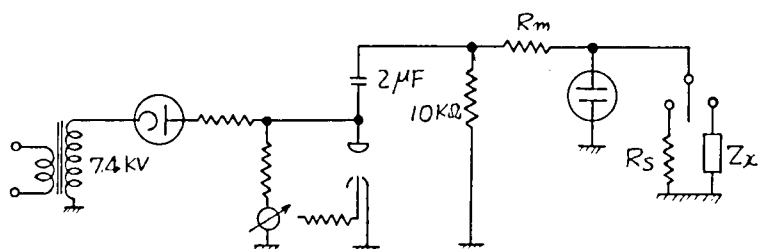
さらに変圧器内部の巻線の内部構造を検討するために1例として単相50KVA 3KV/210V配電用変圧器の3KV巻線を構成する各単位コイルを互に接続をはずし、各単位コイル自身のインデイヤル・インピーダンスおよび各単位コイルの他の単位コイルに対する結合インピーダンスを測定し、その巻線の等価回路を考察した。

以下順を追って記述する。

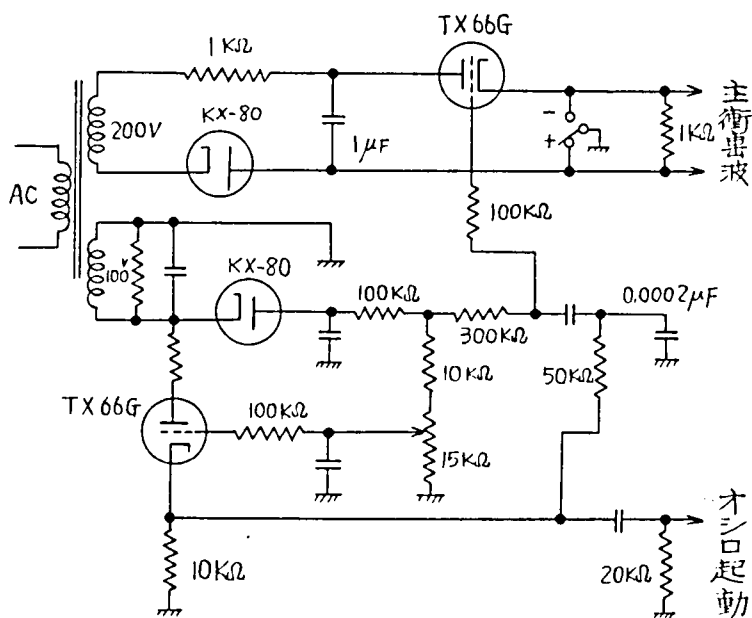
第 2 節 変圧器のインデシヤル・インピーダンス

(1) 変圧器のインデシヤル・インピーダンスの実測値とその等価回路

代表的な 2・3 の変圧器について、そのインデシヤル・インピーダンスを第 2 京大法で測定した。測定回路は第 1.1 図のように $2\mu\text{F}$ のコンデンサーと、 $10\text{K}\Omega$ の抵抗および放電間隙の回路で、矩形衝電圧を発生し、これを高抵抗 R_m を通じて未知インピーダンス Z_x および標準抵抗 R_s に切り換えて加え、それぞれ Z_x および R_s にあられる電圧を高速度ブラウン管により、同一フィルム上に重ねて撮影した。



第 1.1 図 第 2 京大法接続図



第 1.2 図 繰返し衝電圧発生装置

あるいは第1.2図のようなサイラトロンTX66Gを使用した繰返し衝電圧発生装置を上記の矩形衝電圧発生器の代りに用い、測定装置としては高速度ブラウン管の代りにシンクロスコープ(岩崎通信機製SS-5101)を用いて測定した。

この場合 R_s は Z_x と同一程度にブラウン管の偏向を与える値のものを選び R_m は R_s または Z_x に比べていらいしく大にしておくと、 $R_m + R_s$ あるいは $R_m + Z_x$ に流れる電流は R_m によって定まる。すなわち R_s あるいは Z_x に流れる電流は R_m によって定まる一定の矩形波電流となる。従って Z_x および R_s にあらわれる電圧を比較することにより Z_x のインディシャルインピーダンスを求めることができる。

インディシャルインピーダンスの測定は単相10 KVA配電用変圧器(6 KV/210 V)、単相150 KVA絶縁変圧器(6 KV/3 KV)、単相500 KVA変圧器(30 KV/3 KV)、3相10,000 KVA変圧器(30 KV Δ /6 KV Δ)について各巻線のそれぞれの接続について行なった。この測定結果を第1.3図～第1.42図に示す。

インピーダンス・オシログラムを時間関数に書き直すと第1.1～1.7表の2列目の「オシログラムより求めたインピーダンス」に示すようになる。

以上の変圧器のインディシャルインピーダンスを分解すると、

$$(i) \quad A t \cdot H(t) \quad (1.1)$$

$$(ii) \quad A e^{-\alpha t} \sin \omega t \cdot H(t) \quad (1.2)$$

$$(iii) \quad A (\varepsilon^{-\alpha_1 t} - \varepsilon^{-\alpha_2 t}) H(t) \text{ ただし } \alpha_2 > \alpha_1 \quad (1.3)$$

$$(iv) \quad A (1 - \varepsilon^{-\alpha t}) H(t) \quad (1.4)$$

の4つの因子の和よりなっている。

(i) インピーダンス $A t \cdot H(t)$ の等価回路

$A t \cdot H(t)$ に対する p 関数は $\frac{A}{p} \cdot H(t)$ であって

$$\text{静電容量 } C = \frac{1}{A} \quad (1.5)$$

なる回路素子に相当する。

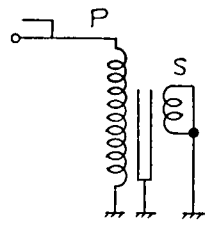
(ii) インピーダンス $A e^{-\alpha t} \sin \omega t \cdot H(t)$ の等価回路

$A e^{-\alpha t} \sin \omega t \cdot H(t)$ に対する p 関数は $(\beta^2 > \alpha^2$ の条件のもとに)

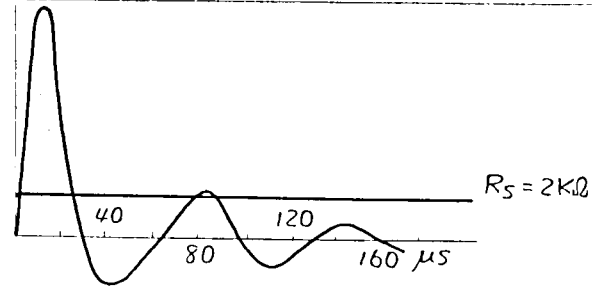
第1-1表 単相10KVA 6.3/0.21KV変圧器1次側より見た インデシャルインピーダンス

オシログラムより求めたインピーダンス

等価回路



第1-3図

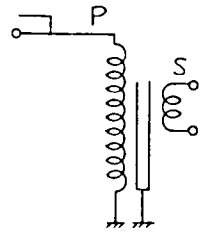
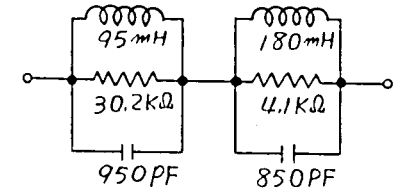


$$C_i = 450 \text{ PF}$$

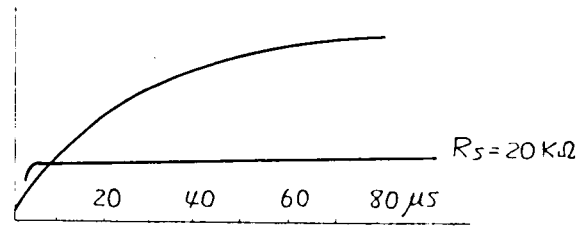
$$Z(t) = \{ 1.0 \times 10^4 e^{-1.74 \times 10^4 t} \sin 1.05 \times 10^5 t + 5.0 \times 10^3 (e^{-2.5 \times 10^4 t} - e^{-2.61 \times 10^5 t}) \} H(t) \Omega$$

60%測定値より求めた

$$C_{i60} = 395 \text{ PF}$$

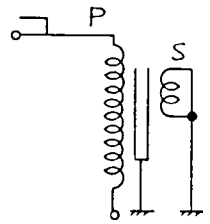
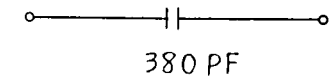


第1-4図

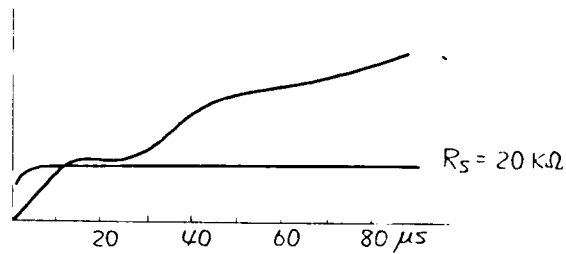


$$C_i = 380 \text{ PF}$$

$$C_{i60} = 265 \text{ PF}$$



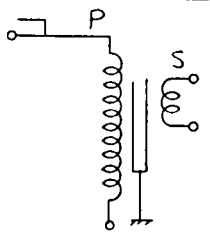
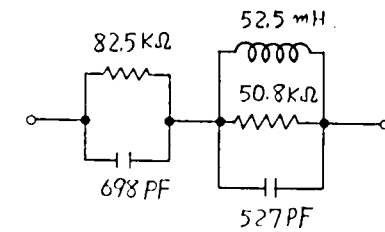
第1-5図



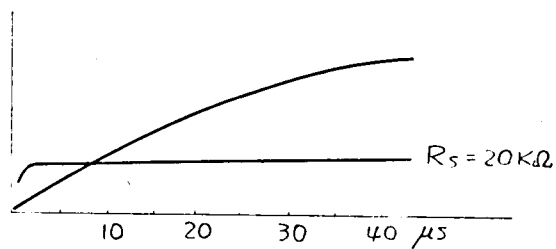
$$C_i = 430 \text{ PF}$$

$$Z(t) = \{ 8.25 \times 10^4 (1 - e^{-1.74 \times 10^4 t}) + 1.0 \times 10^4 e^{-1.87 \times 10^4 t} \sin 1.9 \times 10^5 t \} H(t) \Omega$$

$$C_{i60} = 395 \text{ PF}$$

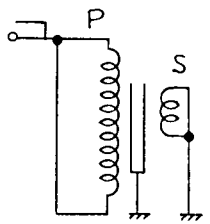
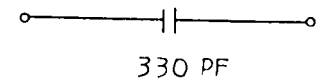


第1-6図

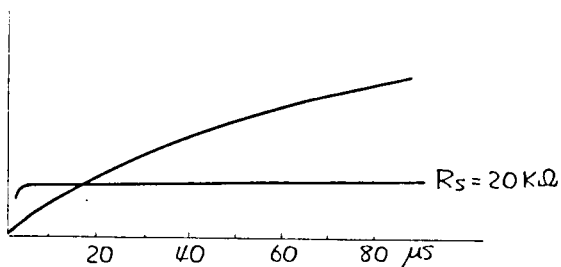


$$C_i = 330 \text{ PF}$$

$$C_{i60} = 265 \text{ PF}$$

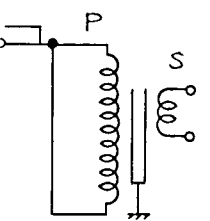
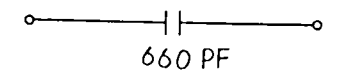


第1-7図

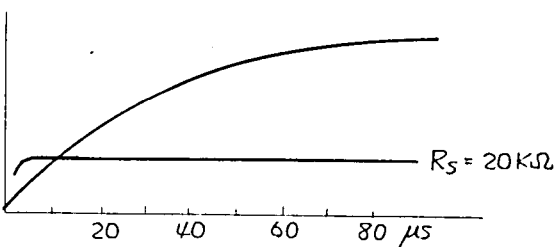


$$C_i = 660 \text{ PF}$$

$$C_{i60} = 999 \text{ PF}$$

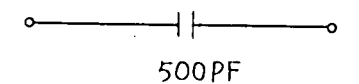


第1-8図



$$C_i = 500 \text{ PF}$$

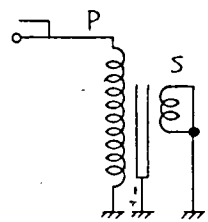
$$C_{i60} = 462 \text{ PF}$$



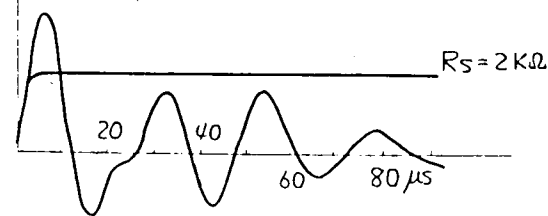
第1-2表 単相150KVA 6.3/3.3kV 変圧器1次側よ見たインディシャルインピーダンス

オシログラムより求めたインピーダンス

等価回路



第1-9図

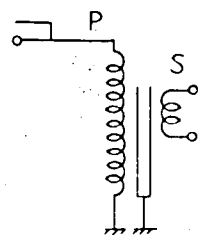
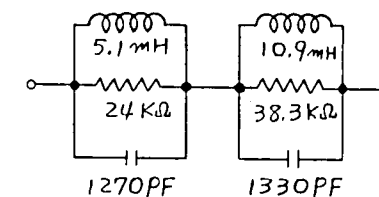


$$C_L = 1000 \text{ PF}$$

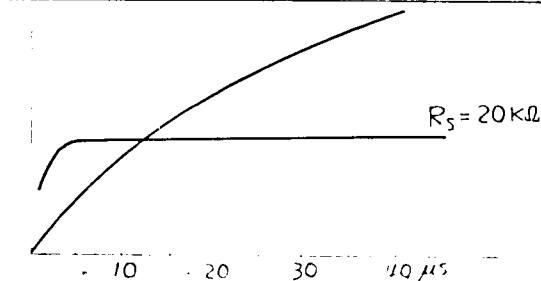
$$Z(t) = \left\{ 2.0 \times 10^3 e^{-1.6 \times 10^4 t} \sin 3.93 \times 10^5 t \right. \\ \left. + 2.86 \times 10^3 e^{-9.8 \times 10^4 t} \sin 2.62 \times 10^5 t \right\} H(t) \Omega$$

60%測定値より求めた

$$C_{L60} = 680 \text{ PF}$$

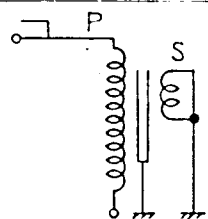
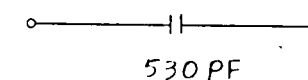


第1-10図

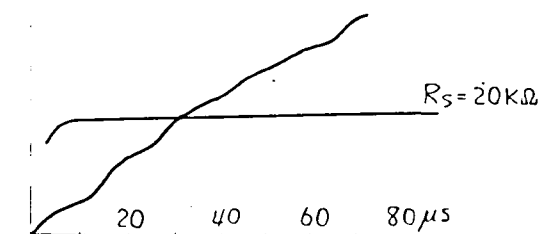


$$C_L = 530 \text{ PF}$$

$$C_{L60} = 530 \text{ PF}$$



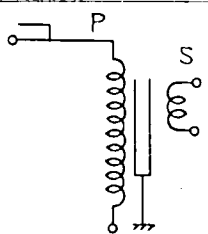
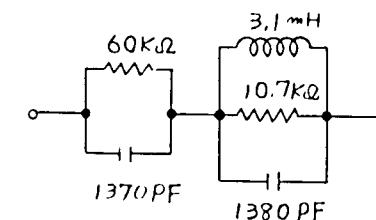
第1-11図



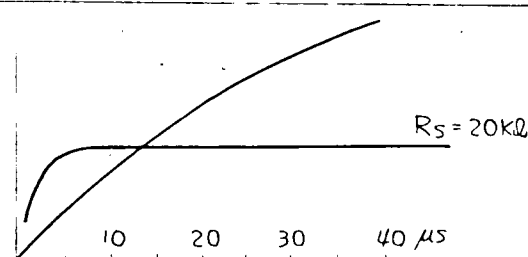
$$C_L = 610 \text{ PF}$$

$$Z(t) = \left\{ 1.5 \times 10^3 e^{-3.39 \times 10^4 t} \sin 4.81 \times 10^5 t \right. \\ \left. + 6.0 \times 10^4 (1 - e^{-1.22 \times 10^4 t}) \right\} H(t) \Omega$$

$$C_{L60} = 680 \text{ PF}$$

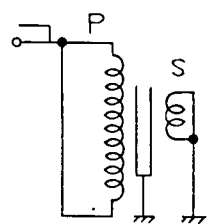
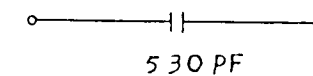


第1-12図

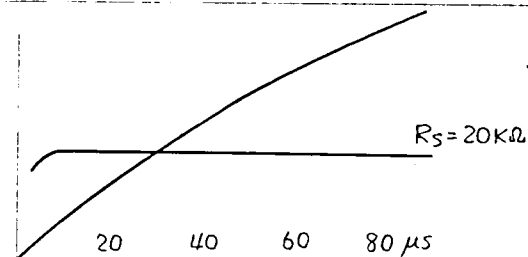


$$C_L = 530 \text{ PF}$$

$$C_{L60} = 530 \text{ PF}$$

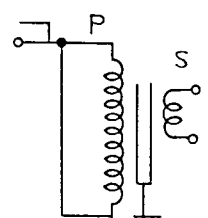
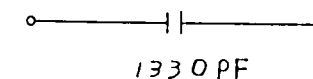


第1-13図

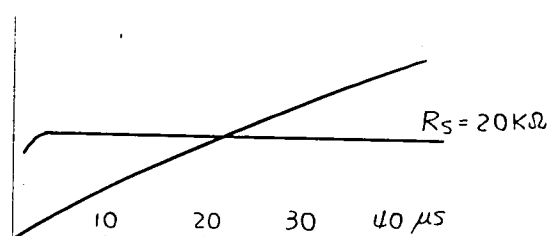


$$C_L = 1330 \text{ PF}$$

$$C_{L60} = 1700 \text{ PF}$$

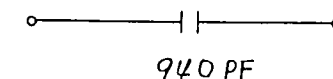


第1-14図



$$C_L = 940 \text{ PF}$$

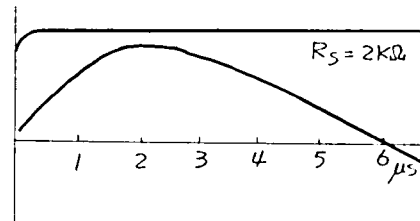
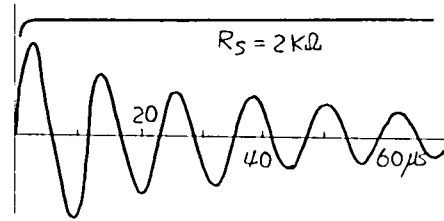
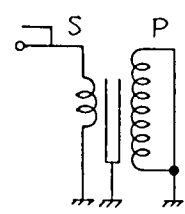
$$C_{L60} = 1098 \text{ PF}$$



第1-3表 単相150KVA $\frac{6.3}{3.3}$ KV変圧器 2次側より見たインディシャルインピーダンス

オシログラムより求めたインピーダンス

等価回路



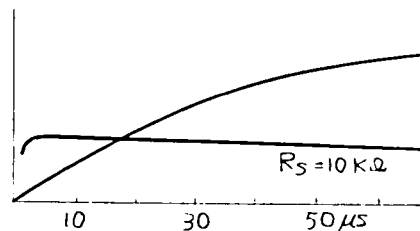
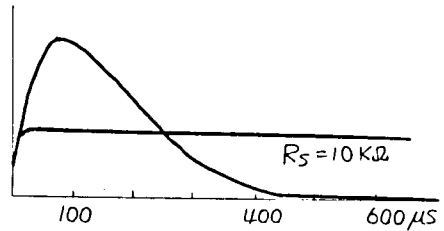
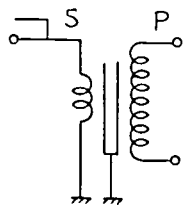
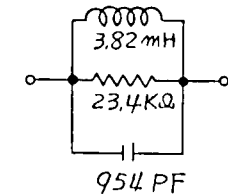
第1-15図

$$C_i = 600 \text{ PF}$$

$$Z(t) = 2.0 \times 10^3 e^{-2.24 \times 10^4 t} \sin 5.24 \times 10^5 t \cdot H(t) \Omega$$

60°C測定値より求めた

$$C_{i60} = 830 \text{ PF}$$

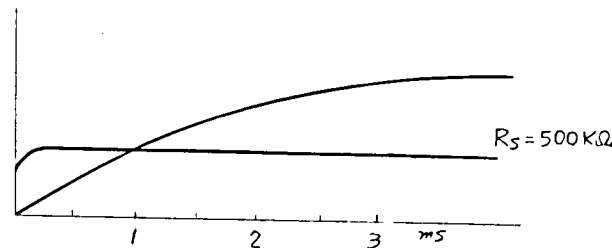
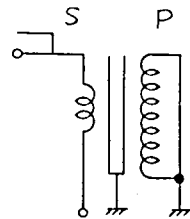
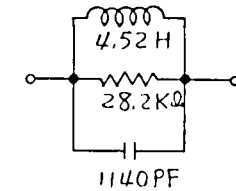


第1-16図

$$C_i = 1400 \text{ PF}$$

$$Z(t) = 6.3 \times 10^4 (e^{-8.62 \times 10^4 t} - e^{-2.25 \times 10^6 t}) H(t) \Omega$$

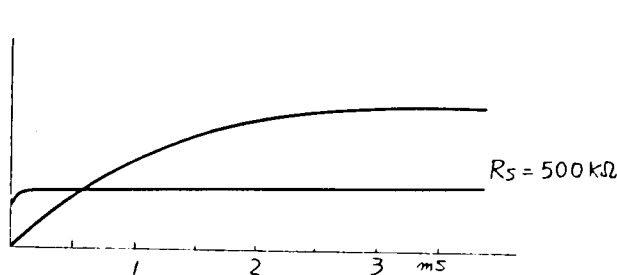
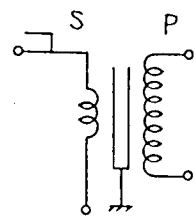
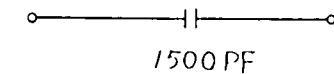
$$C_{i60} = 530 \text{ PF}$$



第1-17図

$$C_i = 1500 \text{ PF}$$

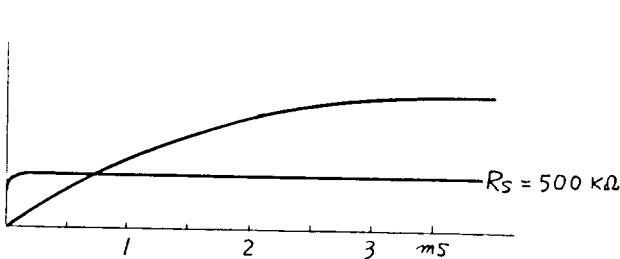
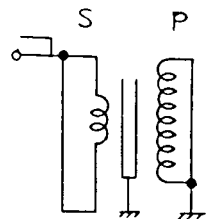
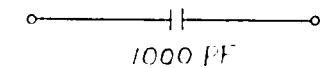
$$C_{i60} = 830 \text{ PF}$$



第1-18図

$$C_i = 1000 \text{ PF}$$

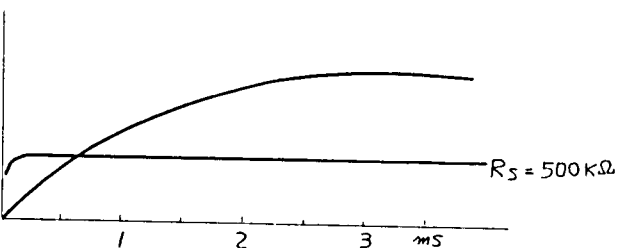
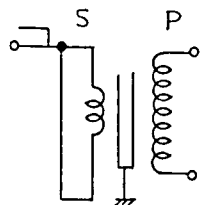
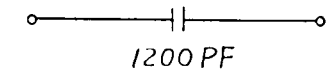
$$C_{i60} = 580 \text{ PF}$$



第1-19図

$$C_i = 1200 \text{ PF}$$

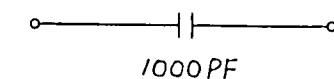
$$C_{i60} = 1660 \text{ PF}$$



第1-20図

$$C_i = 1000 \text{ PF}$$

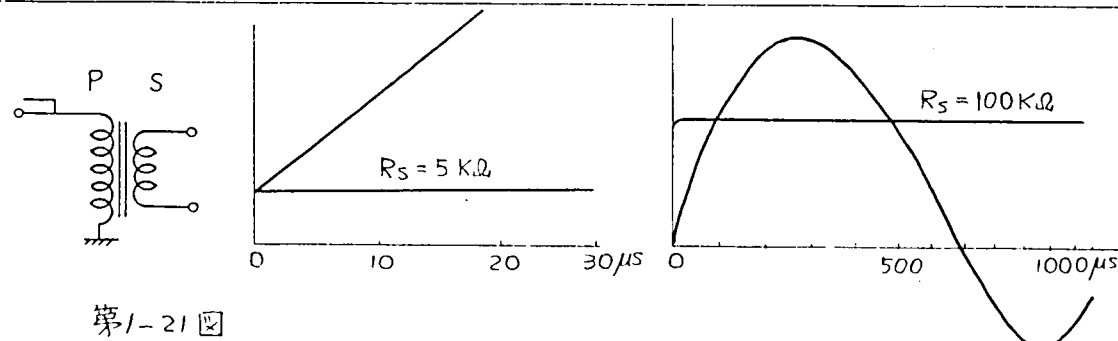
$$C_{i60} = 1081 \text{ PF}$$



第1-4表 単相 500KVA $30\text{KV}/3\text{KV}$ 変圧器の1次側より見たインディシャル・インピーダンス

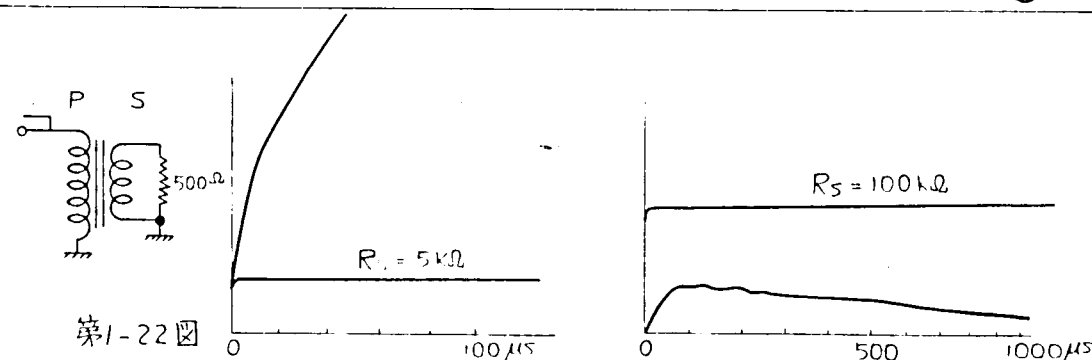
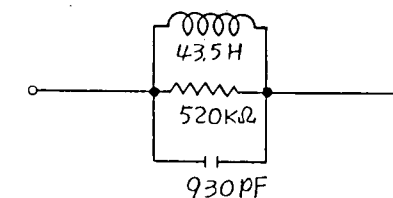
オシログラムより求めたインピーダンス

等価回路



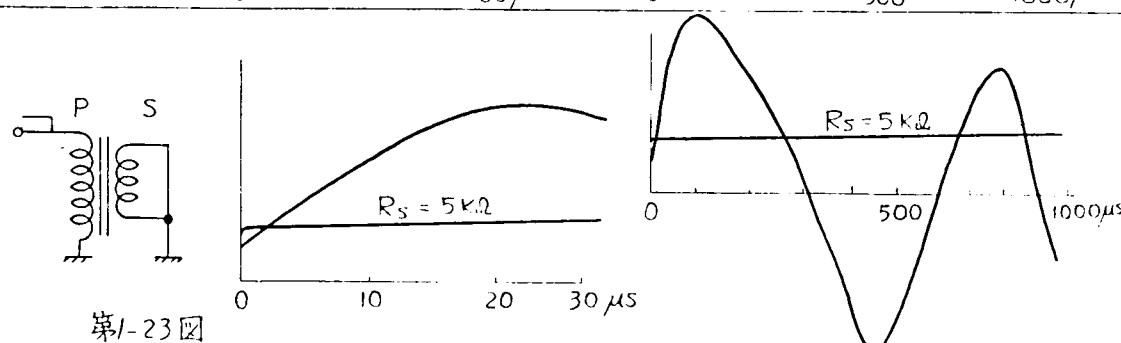
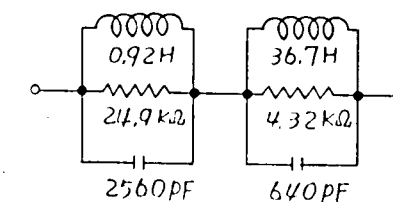
$$C_i = 1030 \text{ PF}$$

$$Z(t) = 2.22 \times 10^5 e^{-1.03 \times 10^3 t} \sin 4.84 \times 10^3 t \cdot H(t) \Omega$$



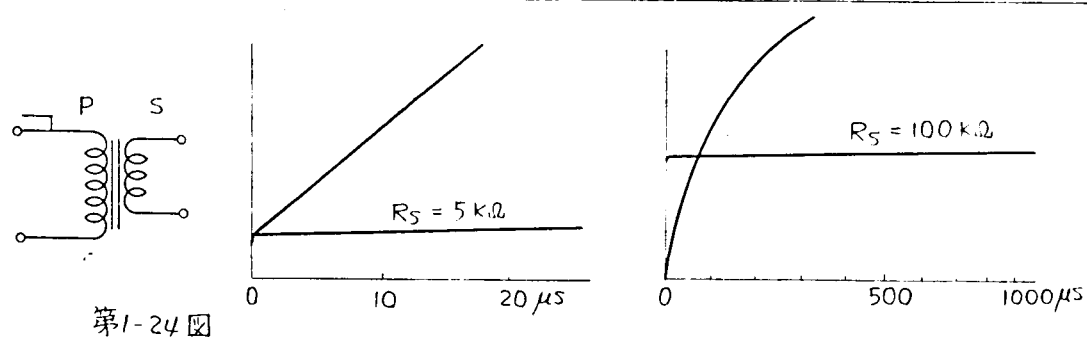
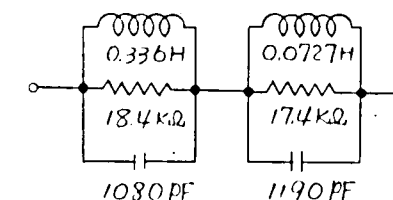
$$C_i = 1300 \text{ PF}$$

$$Z(t) = \{4.46 \times 10^4 (e^{-1.22 \times 10^3 t} - e^{-3.48 \times 10^4 t}) + 3.53 \times 10^3 e^{-4.52 \times 10^3 t} \sin 1.03 \times 10^5 t\} H(t) \Omega$$

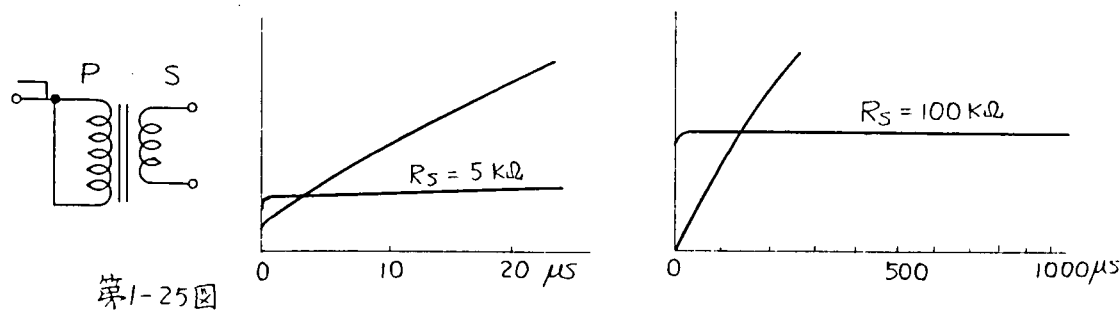
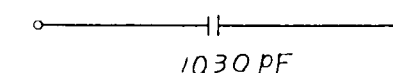


$$C_i = 1310 \text{ PF}$$

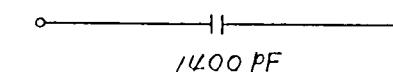
$$Z(t) = \{1.76 \times 10^4 e^{-2.5 \times 10^3 t} \sin 5.23 \times 10^4 t + 8 \times 10^3 e^{-2.31 \times 10^4 t} \sin 1.05 \times 10^5 t\} H(t) \Omega$$



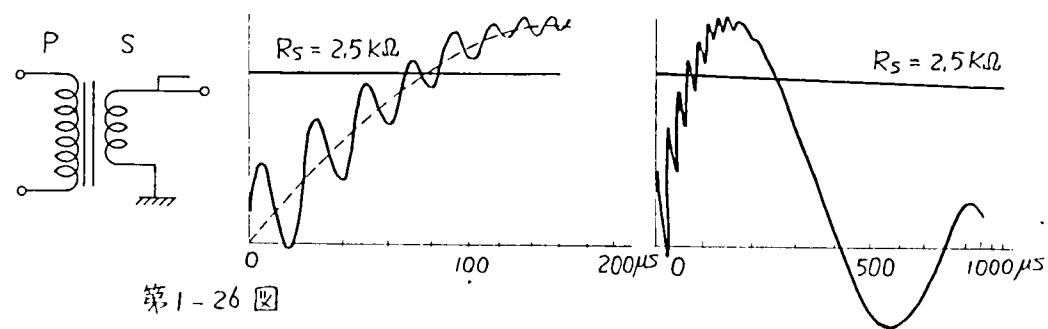
$$C_i = 1030 \text{ PF}$$



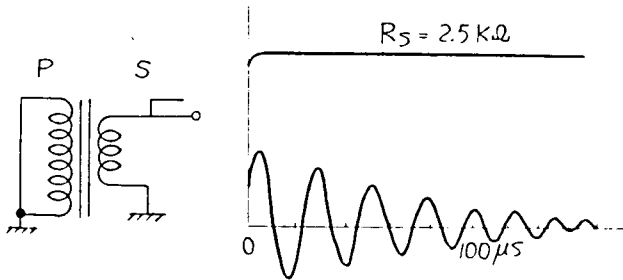
$$C_i = 1400 \text{ PF}$$



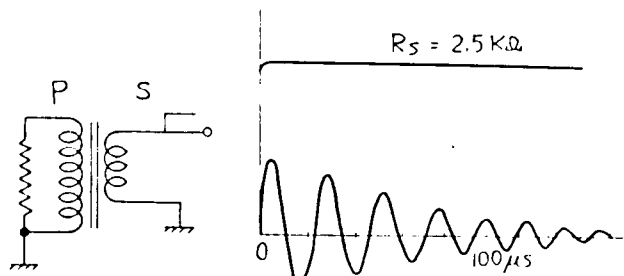
第1-5表 単相500KVA 30KV/3KV変圧器の2次側より見たインディシャルインピーダンス



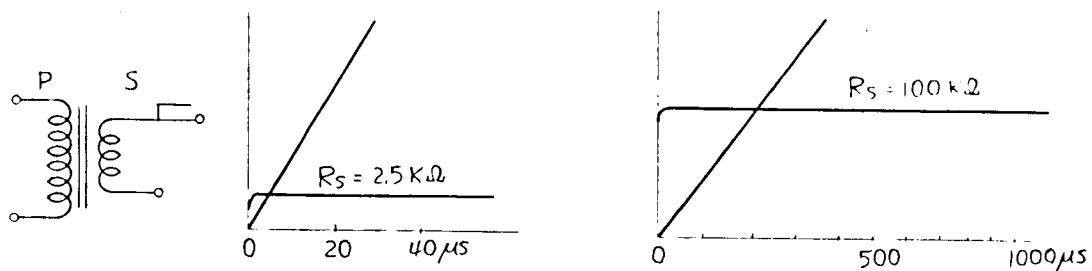
第1-26図



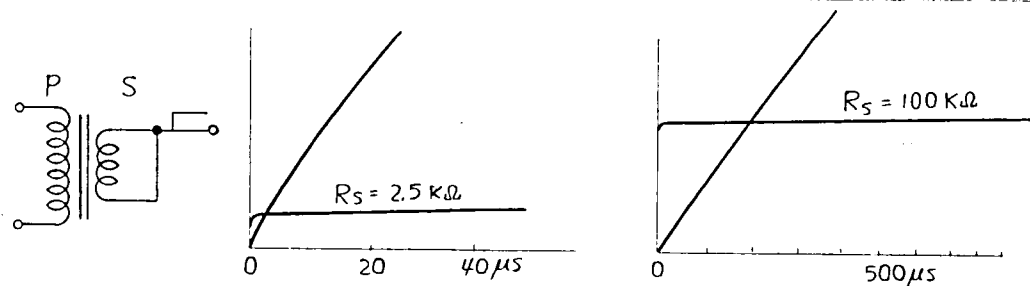
第1-27図



第1-28図



第1-29図



第1-30図

オシログラムより求めたインピーダンス

$$C_i = 4000 \text{ PF}$$

$$Z(t) = \{ 9.85 \times 10^2 e^{-1.33 \times 10^4 t} \sin 2.62 \times 10^5 t + 4.85 \times 10^3 e^{-2.21 \times 10^3 t} \sin 7.86 \times 10^3 t \} H(t) \Omega$$

$$C_i = 4000 \text{ PF}$$

$$Z(t) = 1.235 \times 10^3 e^{-1.33 \times 10^4 t} \sin 2.62 \times 10^5 t \cdot H(t) \Omega$$

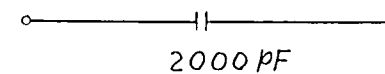
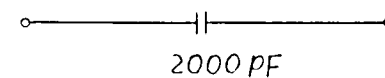
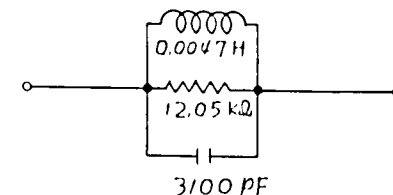
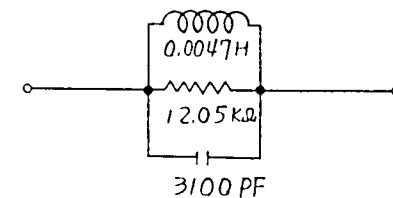
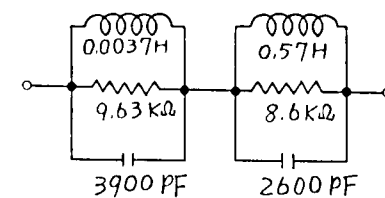
$$C_i = 4000 \text{ PF}$$

$$Z(t) = 1.235 \times 10^3 e^{-1.33 \times 10^4 t} \sin 2.62 \times 10^5 t \cdot H(t) \Omega$$

$$C_x = 2000 \text{ PF}$$

$$C_i = 2000 \text{ PF}$$

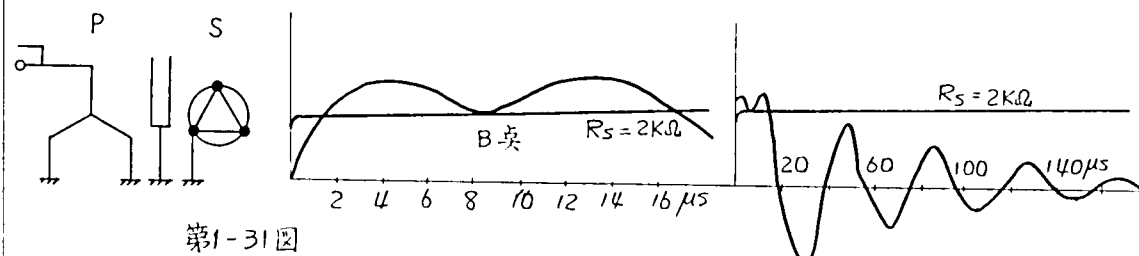
等価回路



第1-6表 3相10MVA³⁰/6.9KV変圧器1次側よ見たインディシャルインピーダンス

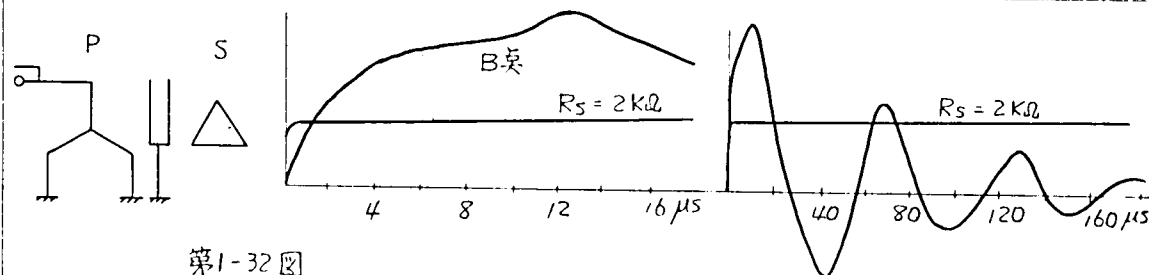
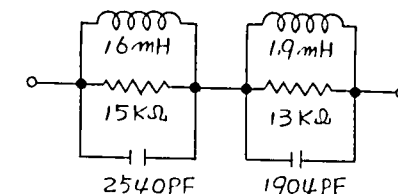
オシログラムより求めたインピーダンス

等価回路



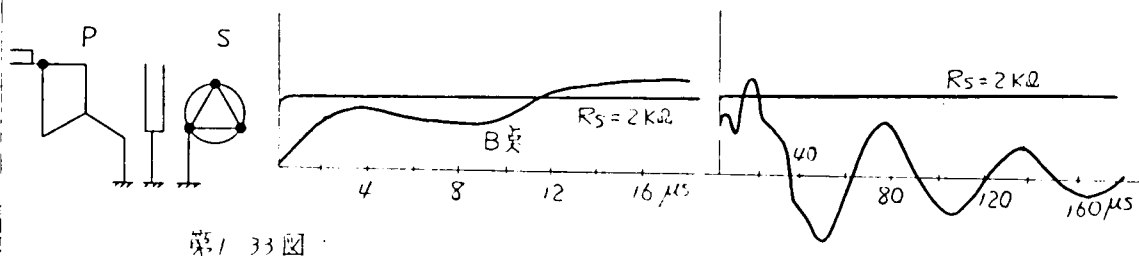
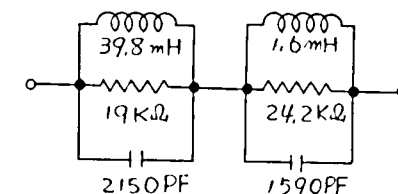
$$C_i = 500 \text{ PF}$$

$$Z(t) = \{ 2.5 \times 10^3 e^{-1.3 \times 10^4 t} \sin 1.56 \times 10^5 t + 1.0 \times 10^3 e^{-2.05 \times 10^4 t} \sin 5.2 \times 10^5 t \} H(t) \Omega$$



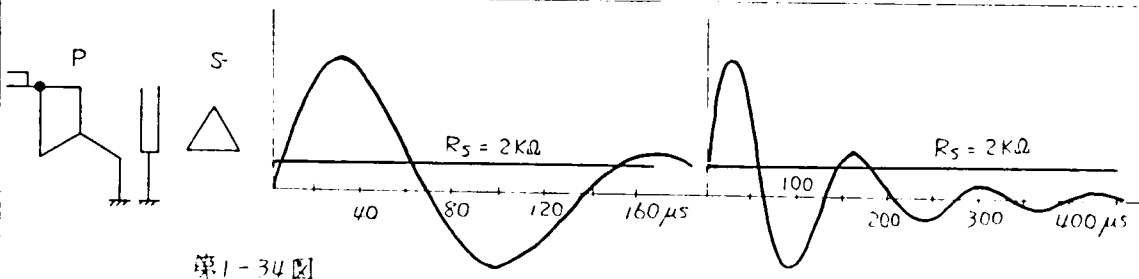
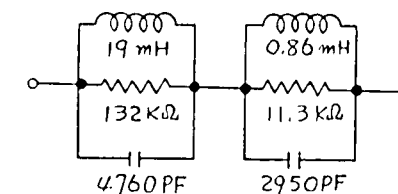
$$C_i = 400 \text{ PF}$$

$$Z(t) = \{ 4.3 \times 10^3 e^{-1.22 \times 10^4 t} \sin 1.08 \times 10^5 t + 1 \times 10^3 e^{-1.29 \times 10^4 t} \sin 6.28 \times 10^5 t \} H(t) \Omega$$



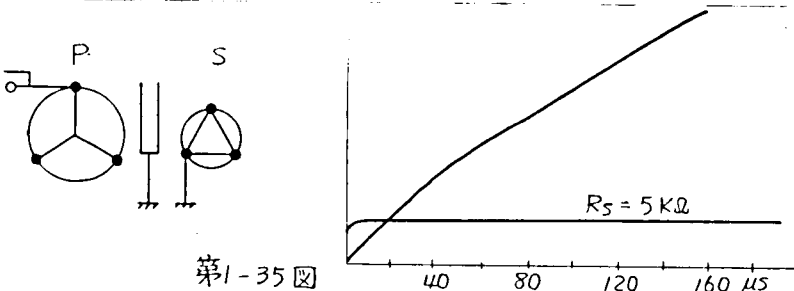
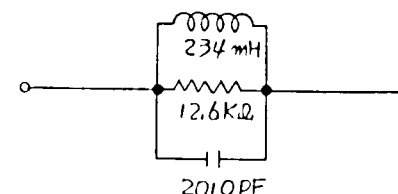
$$C_i = 1100 \text{ PF}$$

$$Z(t) = \{ 2 \times 10^3 e^{-8.05 \times 10^2 t} \sin 1.05 \times 10^5 t + 5.4 \times 10^2 e^{-1.53 \times 10^4 t} \sin 6.28 \times 10^5 t \} H(t) \Omega$$

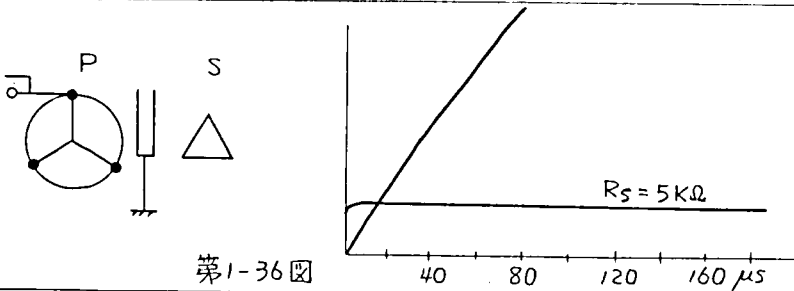
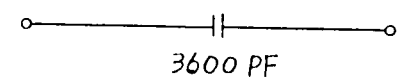


$$C_i = 900 \text{ PF}$$

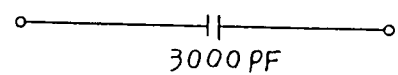
$$Z(t) = 1.08 \times 10^4 e^{-1.97 \times 10^4 t} \sin 4.62 \times 10^4 t + H(t) \Omega$$



$$C_i = 3600 \text{ PF}$$



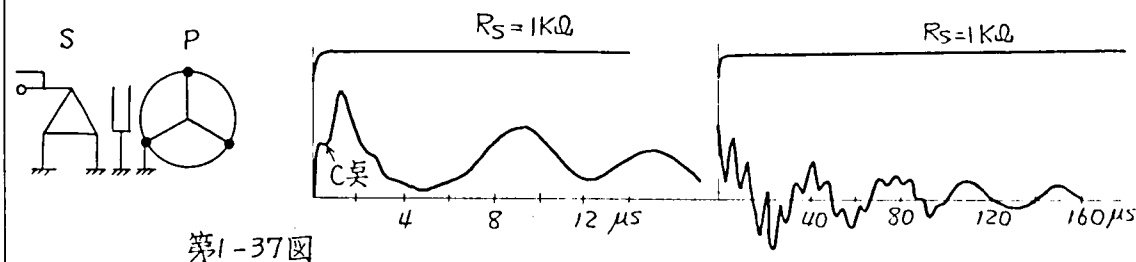
$$C_i = 3000 \text{ PF}$$



第1-7表 3相10MVA 33/6.9kV変圧器2次側よ見たインディシャルインピーダンス

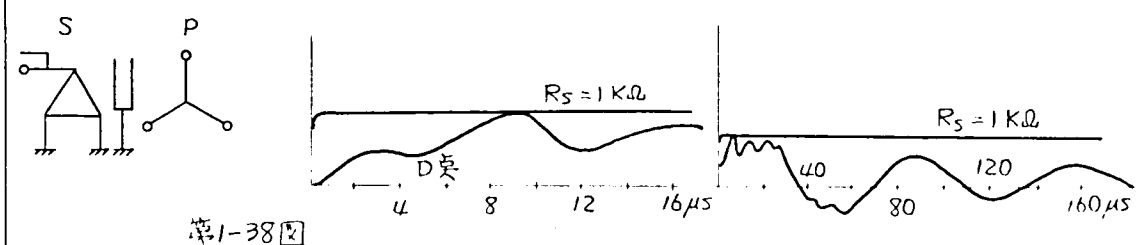
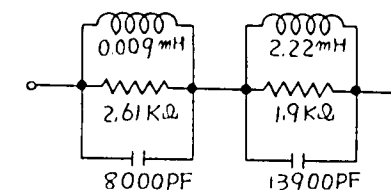
オシログラムより求めたインピーダンス

等価回路



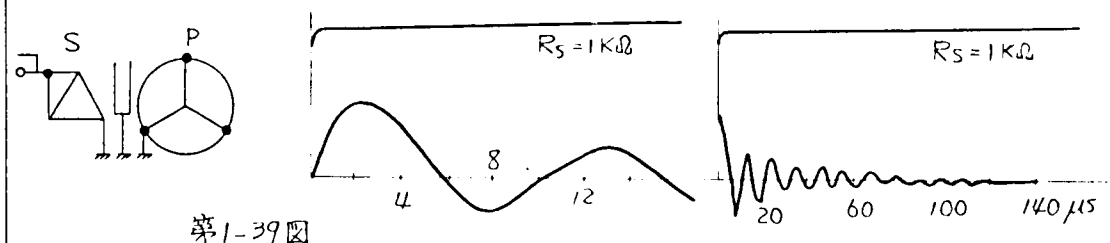
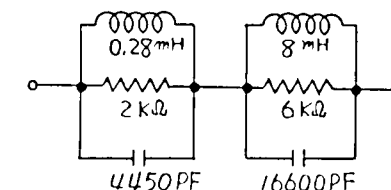
$$C_L = 1700 \text{ PF}$$

$$Z(t) = \left\{ 110 E^{-2.39 \times 10^4 t} \sin 1.14 \times 10^6 t + 400 E^{-1.89 \times 10^4 t} \sin 1.80 \times 10^5 t \right\} H(t) \Omega$$



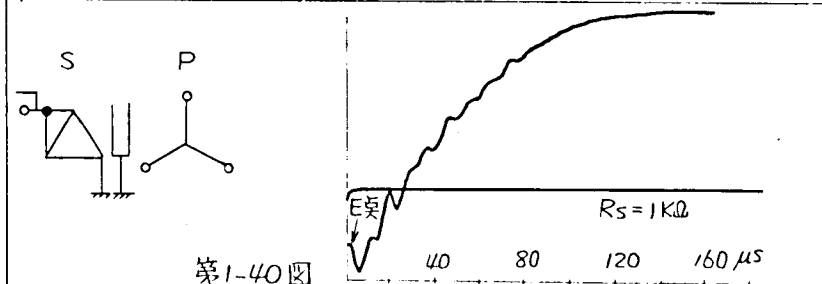
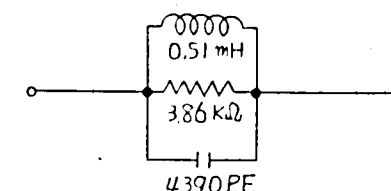
$$C_L = 2000 \text{ PF}$$

$$Z(t) = \left\{ 250 E^{-5.73 \times 10^4 t} \sin 9 \times 10^5 t + 670 E^{-5.12 \times 10^3 t} \sin 9 \times 10^4 t \right\} H(t) \Omega$$



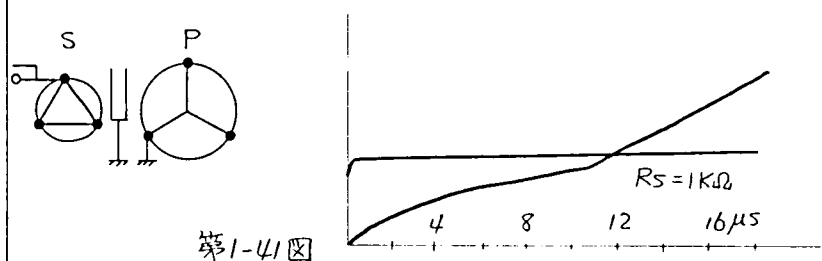
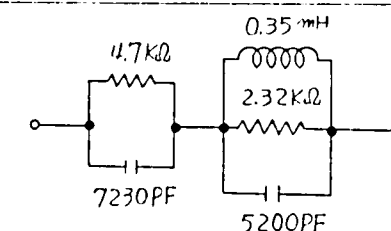
$$C_L = 3000 \text{ PF}$$

$$Z(t) = 340 E^{-2.9 \times 10^4 t} \sin 6.72 \times 10^5 t H(t) \Omega$$

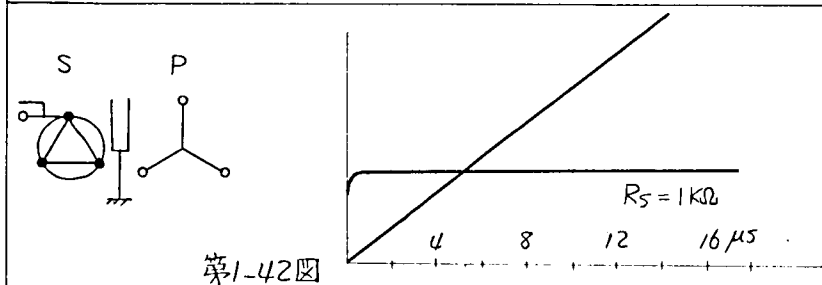
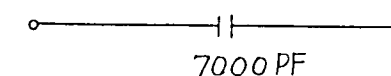


$$C_L = 2400 \text{ PF}$$

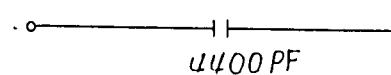
$$Z(t) = \left\{ 4.7 \times 10^3 (1 - E^{-2.95 \times 10^4 t}) + 260 E^{-4.14 \times 10^4 t} \sin 7.4 \times 10^4 t \right\} H(t) \Omega$$



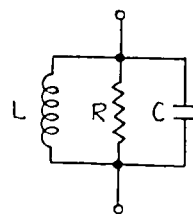
$$C_L = 7000 \text{ PF}$$



$$C_L = 4400 \text{ PF}$$



$$\frac{A\omega p}{p^2 + 2\alpha p + \beta^2} \cdot H(t) = \frac{1}{\frac{p}{A\omega} + \frac{2\alpha}{A\omega} + \frac{\beta^2}{A\omega p}} \cdot H(t)$$



第1.43図

であるから第1.43図で

$$\left. \begin{aligned} C &= \frac{1}{A\omega} \\ R &= \frac{A\omega}{2\alpha} \\ L &= \frac{A\omega}{\beta^2} \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

ただし $\beta^2 = \omega^2 + \alpha^2$ ($\omega \gg \alpha$ の場合は $\omega = \beta$)

とした回路に相当する。

(iii) インピーダンス $A(\varepsilon^{-\alpha_1 t} - \varepsilon^{-\alpha_2 t}) \cdot H(t)$ の等価回路

ただし $\alpha_2 > \alpha_1$ とする

$$A(\varepsilon^{-\alpha_1 t} - \varepsilon^{-\alpha_2 t}) \cdot H(t)$$

に対する p 関数は

$$\frac{Ap(\alpha_2 - \alpha_1)}{p^2 + (\alpha_1 + \alpha_2)p + \alpha_1\alpha_2} \cdot H(t) = \frac{1}{\frac{p}{A(\alpha_2 - \alpha_1)} + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{A(\alpha_2 - \alpha_1)} + \frac{\alpha_1\alpha_2}{Ap(\alpha_2 - \alpha_1)}} \cdot H(t)$$

であるから、同じく第1.43図で

$$\left. \begin{aligned} C &= \frac{1}{A(\alpha_2 - \alpha_1)} \\ R &= \frac{A(\alpha_2 - \alpha_1)}{\alpha_1 + \alpha_2} \\ L &= \frac{A(\alpha_2 - \alpha_1)}{\alpha_1\alpha_2} \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

とした回路に相当する。

(iv) インピーダンス $A(1 - \varepsilon^{-\alpha t}) \cdot H(t)$ の等価回路

$A(1 - \varepsilon^{-\alpha t}) \cdot H(t)$ の p 関数は

$$\frac{1}{\frac{p}{A\alpha} + \frac{1}{A}} \cdot H(t)$$

であるから第1.43図で

$$\left. \begin{array}{l} R = A \\ C = \frac{1}{A\omega} \\ L = \infty \end{array} \right\} \quad (1.8)$$

とした回路に相当する。

この計算を各インピーダンスについて計算したものが第1.1表～第1.7表の3列目に示す等価回路である。

以上求めたインデシヤルインピーダンスおよびその等価回路は過渡現象に対するもので、その時期を全過した以後についての適否は、別に考究すべきものであろう。

(2) 変圧器のインピーダンス・オシログラムに対する考察

(a) 10KVA配電用変圧器のインピーダンス・オシログラムに対する考察

- i) インピーダンス・オシログラムが振動波形となるのは1次巻線1端印加他端接地2次巻線短絡接地の場合で周期は約 $60\mu s$ となり、1次巻線1端印加他端開放2次巻線短絡接地の場合の $A(1-\varepsilon^{-\alpha t}) \cdot H(t)$ の波形に重畳している微小振動周期は約 $33\mu s$ で前者の約 $\frac{1}{2}$ となっている。

上記 $60\mu s$ の周期は後述の電位分布測定の場合の1次巻線1端印加他端開放の場合の振動周期が $63\mu s$ であるのに対応している。

- ii) 1次巻線1端印加他端接地 2次巻線短絡接地の場合以外の結線では、変圧器のインピーダンスはほとんど静電容量としてのみ働くと見てよい。
- iii) 1次巻線1端印加他端接地 2次巻線短絡接地の場合のインダクタンスは、約 $275mH$ と見ることができ、これは60%に対するリアクタンス電圧2.48% ($156V$) より求めたインダクタンス $260mH$ と大差ない。

iv) この変圧器の60%での静電容量を測定した結果は

$$C_{ps} = 890 \text{ PF} \quad (\text{1次巻線対2次巻線間の静電容量})$$

$$C_{pe} = 100 \text{ PF} \quad (\text{1次巻線対接地間の静電容量})$$

$$C_{se} = 610 \text{ PF} \quad (\text{2次巻線対接地間の静電容量})$$

であり、この $60 \text{ } \circ/\text{s}$ の測定値より各接続のインデシヤル・インピーダンスに対応して計算した静電容量とインデシヤル・インピーダンスより求めたその実測値はかなり良く合っている。(第1.1表参照)

b) 150 KVA絶縁変圧器のインピーダンス・オシログラムに対する考察

- i) インピーダンス・オシログラムが振動波形となるのは、1次巻線1端印加他端接地2次巻線短絡接地の場合で、周期約 $24 \mu\text{s}$ のものと $16 \mu\text{s}$ のものとの合成されたものになっている。1次巻線1端印加他端開放2次巻線短絡接地の場合の $A(1-\varepsilon^{-\alpha t}) \cdot H(t)$ の波形に重畳している微小振動周期は約 $13 \mu\text{s}$ で前者の約 $\frac{1}{2}$ になっていること10 KVA変圧器の場合と同様である。

また上記周期 $24 \mu\text{s}$ は、電位分布測定時の1次巻線1端印加他端開放2次巻線短絡接地の場合の振動周期が約 $18 \mu\text{s}$ であることに対応している。

- ii) インダクタンスにつき10 KVA変圧器と同様なことを調べると、1次側より見た $60 \text{ } \circ/\text{s}$ でのインダクタンスは約 20 mH である。これに対しインデシヤル・インピーダンスより求めた等価回路中のインダクタンスは約 16 mH である。

2次側より見た $60 \text{ } \circ/\text{s}$ でのインダクタンスは約 5.5 mH であり、インデシヤル・インピーダンスより求めた等価回路中のインダクタンスは 3.82 mH である。

- iii) 侵入容量について前述10 KVA変圧器と同様に、この場合も $60 \text{ } \circ/\text{s}$ の測定値より計算した静電容量とインデシヤル・インピーダンスより求めたその実測値は大体一致している。(第1.2表参照)

C) 単相500 KVA変圧器のインデシヤル・インピーダンスについての考察

- i) 1次巻線のサージ・インピーダンスは約 5000Ω である。これは第1.21, 1.22, 1.23, 1.24 図のインピーダンス・オシログラムが 5000Ω の実よりはじまっていることより解る。第1.25 図では1次巻線の両端を一括して電圧印加したため、1次巻線の導体が並列となってインピー

ダンスは 2500Ω よりはじまっている。

ii) 2次巻線のサージインピーダンスは明瞭には解らないが第1.30図より約 1000Ω である。

iii) 1次巻線のインピーダンスの振動は1端子加他端接地の場合にのみおこり、2次回路の状態では振動周期が変化する。殊に第1.22図の 500Ω 負荷の場合には非振動状態となっている。1次巻線非接地の場合1次巻線インピーダンスの振動はあらわれず、変圧器は静電容量として働く。

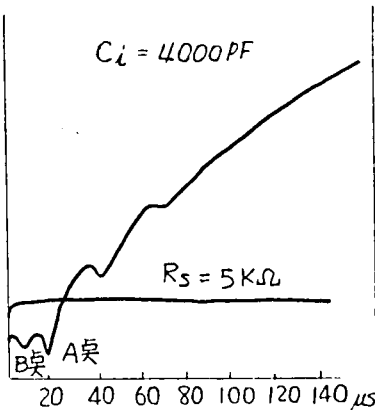
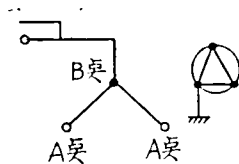
iv) 2次巻線のインピーダンスの振動は1端子加他端接地の場合にのみおこり、小周期の振動と大周期の振動の合成で、1次巻線短絡接地および 500Ω 負荷の場合には大周期の振動はあらわれない。

2次巻線非接地の場合には2次巻線の振動は全然あらわれず静電容量として働く。

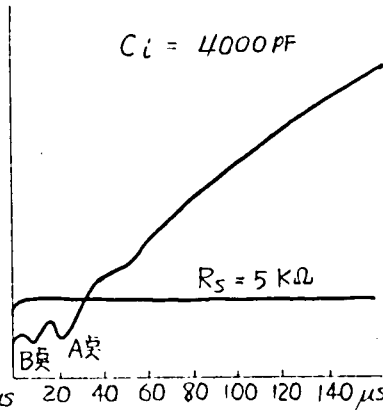
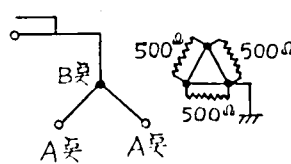
d) 3相10000KVA変圧器のインピーダンス・オシログラムに対する考察

i) 初期に送電線と同様な進行波現象のあらわれる場合があり、第1.44図、第1.45図、第1.46図にそのオシログラムを示す。

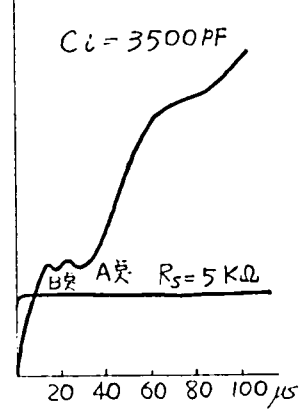
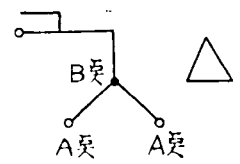
第1.44、1.45、1.46図の波頭の部分A点までは巻線のサージインピーダンスを示し、それぞれ $2.5 K\Omega$ 、 $2.5 K\Omega$ 、 $6.5 K\Omega$ の値となっている。



第1.44図



第1.45図



第1.46図

巻線中の進行波の伝播速度は第 1.44 図の場合約 $150 \text{ m}/\mu\text{s}$, 第 1.46 図では $100 \text{ m}/\mu\text{s}$ となる。

第 1.46 図では 2 次巻線を短絡接地してないので、1 次巻線の対地静電容量が前 2 者に比して小さくなるが、巻線のインダクタンスが顕著に増加することにより、サージインピーダンスが増加し、伝播速度が小さくなっている。

また中性点で 3 相反射している様相が各 オシログラムの B 点で明瞭に出ており、進行波とその他端反射波の重なる部分で、3 相反射が少しあらわれている部分があるが（各図 A 点）これは巻線開放端の静電容量の影響であろう。

また第 1.31 図, 第 1.32 図, 第 1.33 図の場合もインピーダンス・オシログラムの初期の部分 B 点までにサージインピーダンスに相当する部分があり、 $10 \mu\text{s}$ 位までは送電線の進行波現象と同様に取扱つてもよいのではないかと思われる。

第 1.32 図では 2 次巻線が開放非接地であるので 2 次巻線を短絡接地した場合に比べて 1 次巻線の対地静電容量が若干小さく、1 次巻線のインダクタンスがいちじるしく増加し、また伝播速度も小さくなっていることがオシログラムよりわかる。

ii) 2 次巻線のインピーダンス・オシログラムについても初期にサージインピーダンスを示す部分があり、第 1.37 図 C 点, 第 1.38 図 D 点, 第 1.40 図 E 点までがそれであり、以後振動波形になっている。この 2 次巻線のサージインピーダンスは $400 \sim 500 \Omega$ であるが、この場合には 2 次巻線は 2 相が並列であるので各相のサージインピーダンスは $800 \sim 1000 \Omega$ となる。

iii) 10 KVA, 150 KVA 変圧器の場合と同様に 60 c/s での巻線インダクタンスとインデューシャルインピーダンスより求めたインダクタンスを比較して見ると、今星形結線の 1 相分のインダクタンスを L_1 とし、1 次巻線 1 端印加他 2 端接地の場合のそれを $\frac{3L_1}{2}$ として計算して見ると、60 c/s でのインダクタンスは 20 mH となる。これに対し

インデイヤル・インピーダンスよりの測定値は第 1.3 / 図において 17.9 mH となりかなりよく合っている。

第 3 節 変圧器の内部電位振動とインデイヤル・インピーダンスの関連性

(1) 変圧器の内部電位振動に対する考察と、そのインデイヤル・インピーダンスとの関連性

前述第2節でインデイヤル・インピーダンスを求めた変圧器の内部電位振動を測定した。前述第1.2図の繰返し衝電圧発生器より標準衝電圧($1 \times 30 \mu s$)を変圧器巻線に加え、各部の対地電位を前述のシンクロスコープにより測定し、内部電位振動を求めた。

10KVA 6KV/210V単相巻鉄心変圧器の内部電位振動の測定結果を第1.47図に示す。

150KVA 6KV/3KV単相絶縁変圧器の内部電位振動の測定結果を第1.48図および第1.49図に示す。

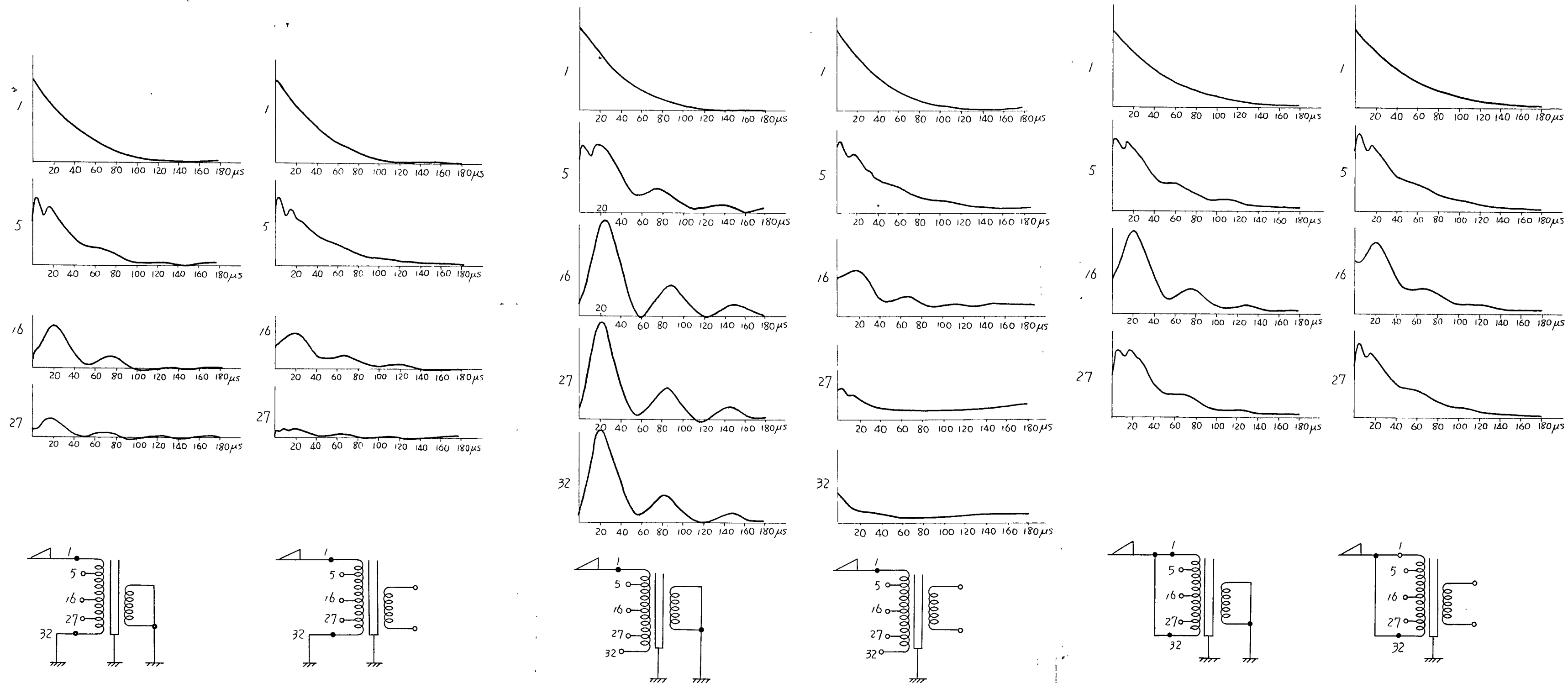
10,000KVA 30KV/6KV 3相電力用変圧器の内部電位振動を第1.50図に示す。

第1.47図、第1.48図、第1.49図、第1.50図より内部電位振動の振動周期を求めると第1.8表のようになる。なお第1.8表には第2節で測定したインデイヤル・インピーダンスの振動周期を最終行に記入した。

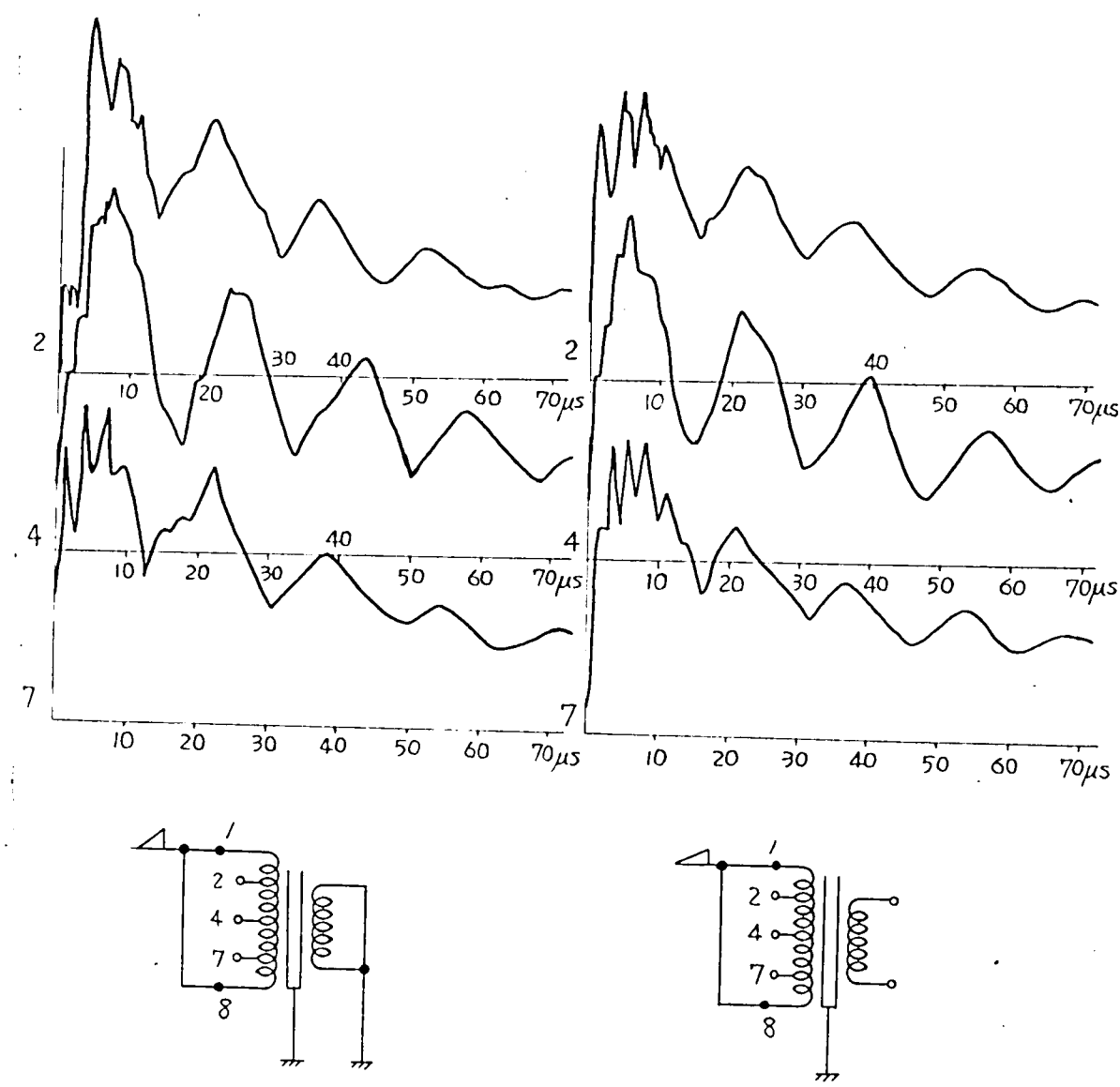
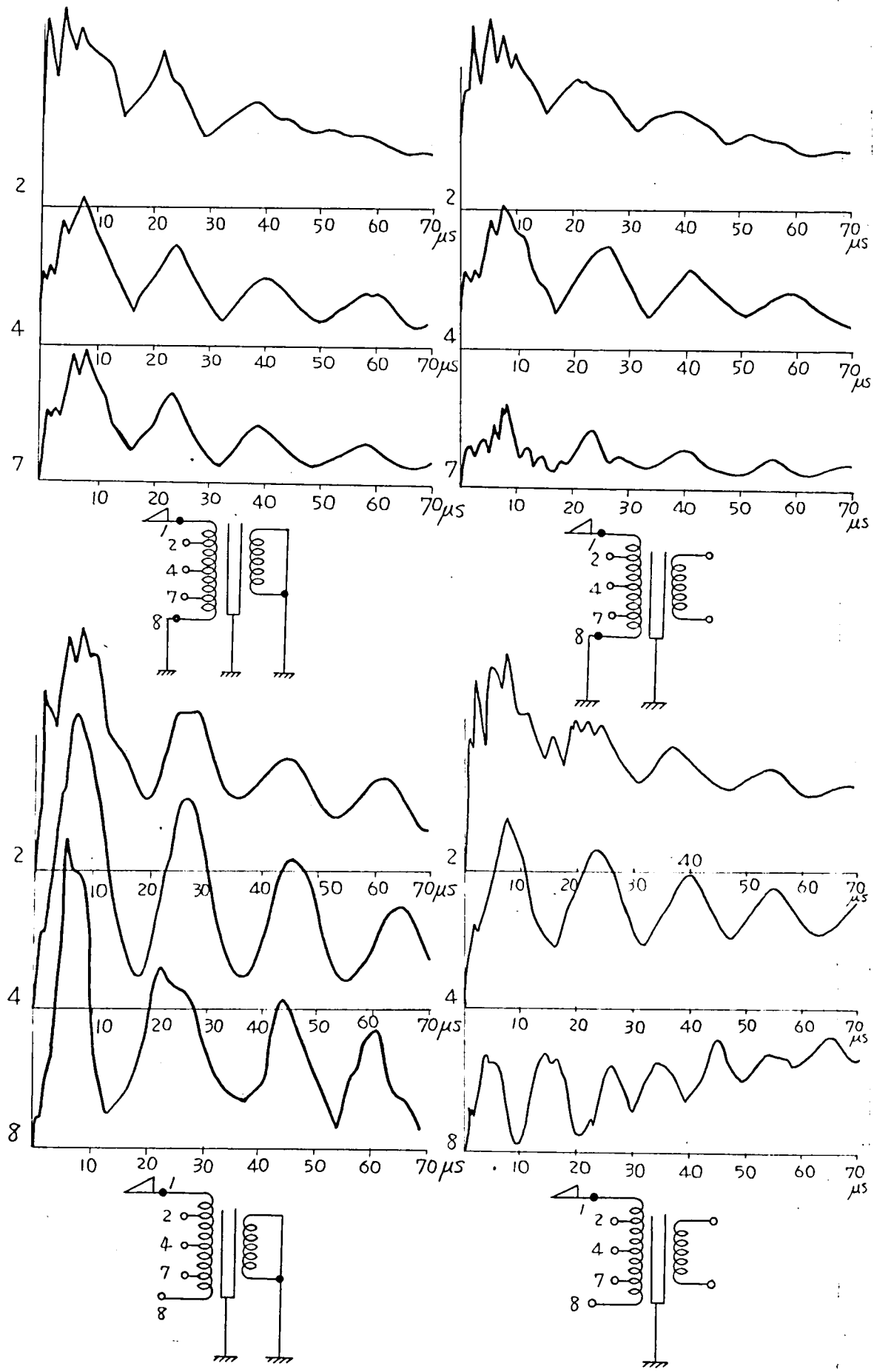
一般に変圧器の巻線は進行波に対して分布常数回路として働く。これは従来より多くの文献において示されていることであり、内部電位振動はこの分布常数回路における定在波の考えから定性的にはほとんど完全に解析される。

しかしながら実際の変圧器においては、その構造上巻線の各点における分布常数はその位置によつて非常に変化することが多く、このような不均一な分布常数回路は特に相互誘導作用をも考慮に入れるとき定式化は非常に困難である。

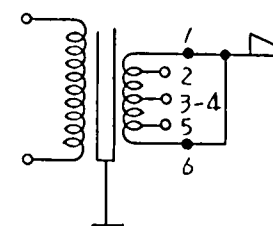
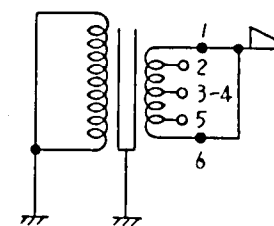
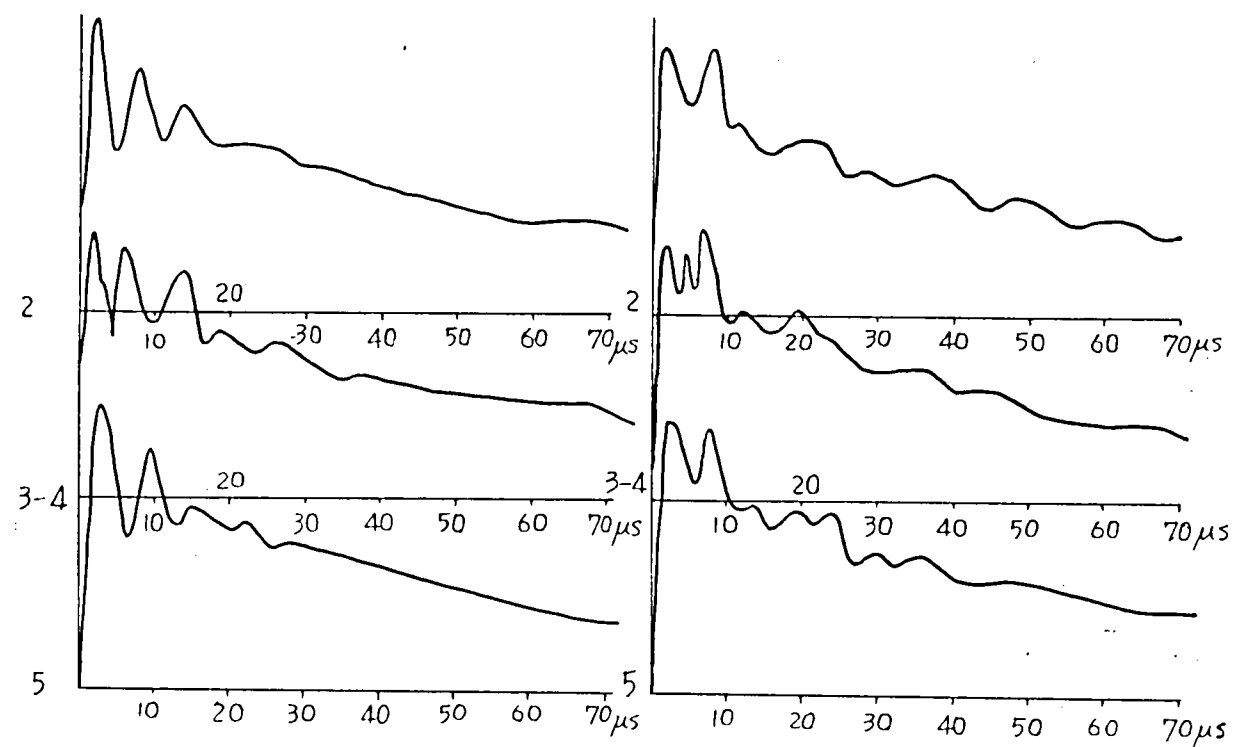
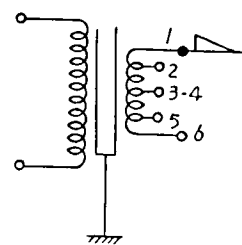
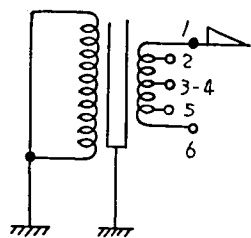
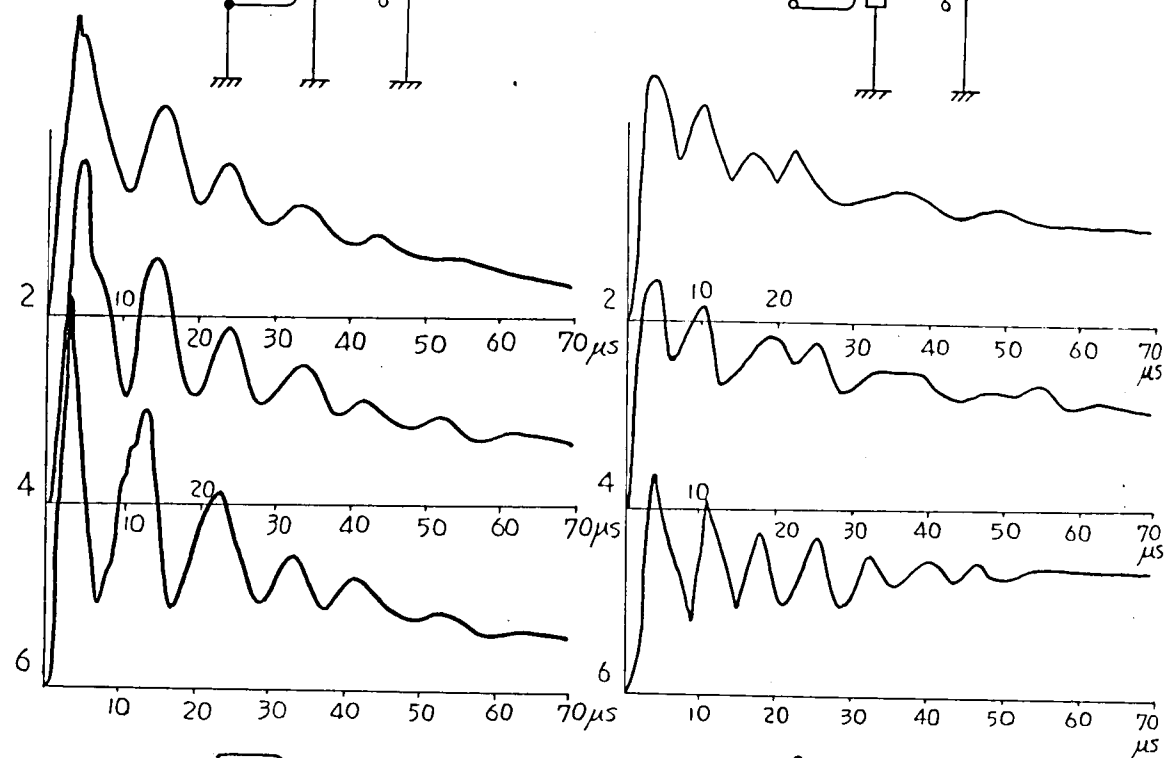
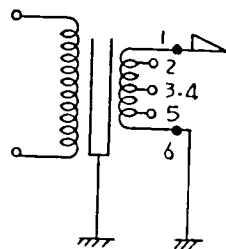
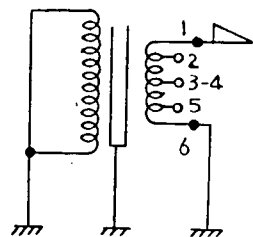
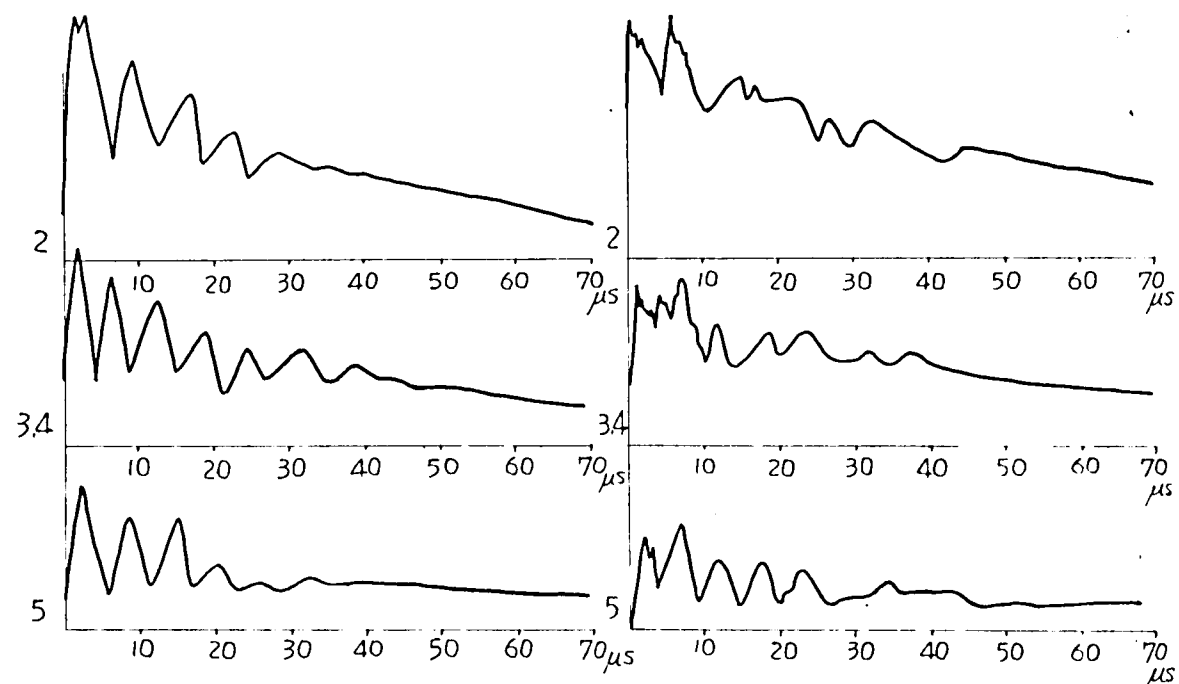
ここで変圧器のインデイヤル・インピーダンスと内部電位振動との関連性を検討するにあつては、変圧器を端子よりみた集中常数として考えた方が比較的便利である。集中常数回路として考えると変圧器巻線の任意点における対地電位の波形を求めることができない場合が多いが、いくつかの之らばい



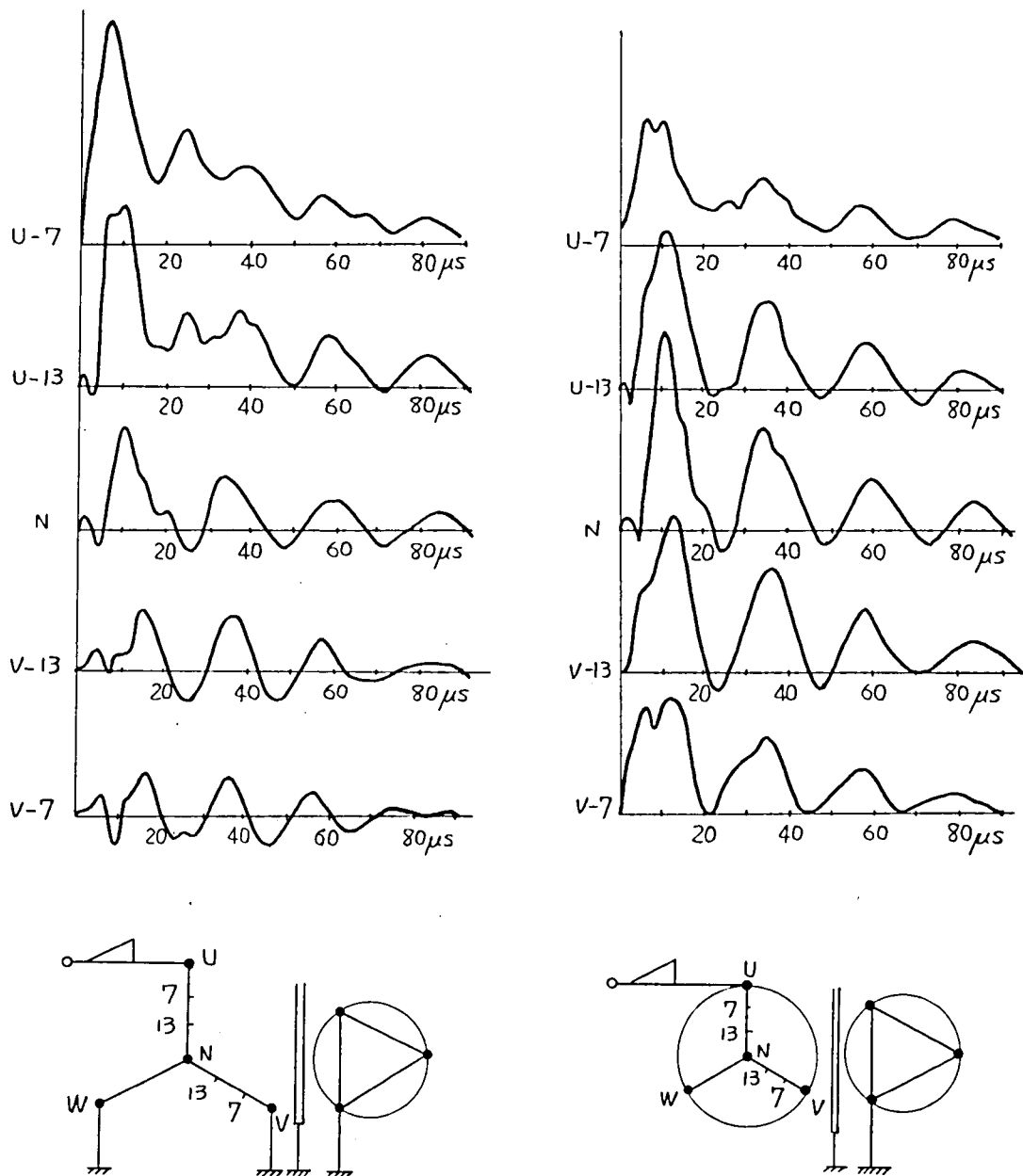
第 1.47 图 10 KVA 单相卷铁心变压器
1 次卷线内部电位振荡



第 1.48 圖 150 KVA 絕緣變壓器
1 次卷線內部電位振動



第1.49圖 150KVA 絕緣變壓器
2次卷線內部電位振動



第 1.50 図

10,000 KVA 電力用変圧器

1 次巻線内部電位振動

第 1.8 表

		内部電位振動		インデシャル・イン ピーダンスの振動	
		周 期	周波数	周 期	周波数
10 KVA 単 相 変圧器	1次1端印加他端接地2次短絡接地	55 μ S	18.2 KC	60 μ S	16.6 KC
	1次1端印加他端接地2次開放	53 "	18.9 "		
	1次1端印加他端開放2次短絡接地	63 "	15.4 "	33 μ S	30.3 KC
	1次1端印加他端開放2次開放	47 "	21.3 "		
	1次両端印加2次短絡接地	55 "	18.2 "		
	1次両端印加2次開放	51 "	19.6 "		
150 KVA 単 相 絶 縁 変圧器	1次1端印加他端接地2次短絡接地	17 "	59 "	24 μ S	41.6 KC
	1次1端印加他端接地2次開放	17 "	59 "		
	1次1端印加他端開放2次短絡接地	19 "	52.5 "	13 μ S	77 KC
	1次1端印加他端開放2次開放	16 "	62.5 "		
	1次両端印加2次短絡接地	17 "	59 "		
	1次両端印加2次開放	17 "	59 "		
	2次1端印加他端接地1次短絡接地	6 "	166 "	13 μ S	77 KC
	2次1端印加他端接地1次開放	6 "	166 "		
	2次1端印加他端開放1次短絡接地	9 "	111 "		
	2次1端印加他端開放1次開放	7 "	142 "		
	2次両端印加1次短絡接地	7 "	142 "		
	2次両端印加1次開放	6 "	166 "		
10,000 KVA 3 相 変圧器	1次1端印加他2端接地2次短絡接地	25 "	40 "	35 μ S	28.5 KC
	1次3相一括印加2次短絡接地	23 "	43.5 "		
	1次中性点印加線端子接地2次短絡接地			20 μ S	50 KC

た矣における対地電位の振動を検討するために各矣の間を集中常数と考へて結合すればよい。以下において電位振動の基本波に着目し、定在波の理論を考慮しつつ、このような集中常数回路的取扱ひをしてみる。

第1.51図、第1.53図に示される10KVA 6KV/210V単相巻鉄心変圧器および150KVA 6KV/3KV単相絶縁変圧器においてはその1次巻線は2群に分れており、かつその巻線のうち端部にある巻線が対向している他の巻線との間に大きな静電容量をもっているので、分布定数回路の端の部分にのみ静電容量が大きく集中することになり、考察が非常に難しくなるので、基本波成分のみを検討するには仮に2群の集中定数回路の組合せと考えて大きな誤りはないものと考えられる。

10,000 KVA 30KV/6KV 3相電力用変圧器は第1.55図のような巻線構造であるので、巻線を分布定数回路として考察する。

(a) 10 KVA 6KV/210V単相巻鉄心変圧器1次巻線の内部電位振動についての考察

この10KVA変圧器は第1.51図に示す巻線配置で1次巻線は2コイルよりなり、各コイルは2次巻線にはさまれた層巻コイルであるから、最外部の層および最内部の層のみ2次巻線に対して静電容量をもっており、その中間の14層は対地容量はほとんどなく、隣の層との間にしか静電容量がないと考えてよい。従って10KVA変圧器1次巻線の等価回路は第1.52図(A)のように2次巻線に対する静電容量 γ を有する1層の層巻線と、層巻線間の静電容量 δ を有する14層の層巻線の構成よりなる。さらに静電容量が巻線の端部に集中してあると仮想すればその等価回路は第1.52図(B)のように2つのインダクタンス L 、その相互間の相互インダクタンス M 、 L の両端に接続されたインダクタンスに並列な静電容量 C_a と2次巻線との間の静電容量 C_b とにまとめて考えることができる。

インデシヤルインピーダンスを測定する場合には、被測定回路の入力のところに、測定されるインデシヤルインピーダンスより非常に大きな抵抗 R_m を接続するので電圧印加回路は被測定回路に対して開放端として働き、一方内部電位振動測定時は電圧印加回路のインピーダンスは被測定回路のそれに比しかなり小さいので直接接地に近く、第1.52図の等価回路にこの考えを適用すると、1端印加他端接地のインデシヤルインピーダンスの被測定回路と、1端印加他端開放の内部電位振動のそれとは同一構

成回路となるので振動の周期は同一となり、実測は $60\mu\text{s}$ と $63\mu\text{s}$ で良く一致する。

(b) 150 KVA 6KV/3KV 単相絶縁変圧器の内部電位振動についての考察

この 150 KVA 絶縁変圧器の巻線配置は、第 1.53 図のようであるので 1 次巻線は 2 群よりなっており、各群は 6 枚のデイスコイルよりなっており、その外側のデイスコイルは 2 次巻線との向および接地との間に静電容量があるが、中間の 4 枚のデイスコイルは 1 次巻線のデイスコイル相互間、および大地との間に静電容量がある。従って 150 KVA 絶縁変圧器 1 次巻線より見た等価回路は近似的に 10 KVA 変圧器の 1 次巻線のそれと同じく第 1.52 図(A),(B)と同様になる。

150 KVA 絶縁変圧器の 2 次巻線では、その等価回路は第 1.54 図(A)に示すように最も外側のデイスコイルは鉄心に対して直接静電容量 γ をもっている。両外側より 2 目、3 目のデイスコイルは 1 次巻線に対して静電容量 γ をもっており、また 3 目と 4 目の間、および両端より 4 目のデイスコイル相互間には静電容量 δ で代表された 2 次巻線相互間の静電容量がある。これをさらに第 1.52 図と同様、左右半分ずつ 2 群に分けて考えると第 1.54 図(B)のような等価回路となり、4 つのインダクタンス ℓ とその各インダクタンス間での相互インダクタンス m 、および各群間の相互インダクタンス M とその端子間あるいは端子と 2 次巻線との間に接続された静電容量 Ca' , Cb' 等となる。さらに簡単に中性点のみの振動を考えると、2 つのインダクタンス ℓ とその相互インダクタンス m をまとめて、 $L = 2\ell + 2m$ とおき、2 つのインダクタンス ℓ の中央にある $2Cb'$ は L の端に移して、新たに Cb と考えると、第 1.52 図(B)と大体同様に考えることができる。

またこの第 1.54 図の等価回路について考察すると(a)項で述べたように、1 端印加他端接地のインディシャル・インピーダンスの振動と、1 端印加他端開放の内部電位振動は大体同一周期をもつべきである。実際はそれぞれ 1 次巻線では $24\mu\text{s}$ と $19\mu\text{s}$ 、2 次巻線では $13\mu\text{s}$ と $9\mu\text{s}$ となり、若干の差異があった。

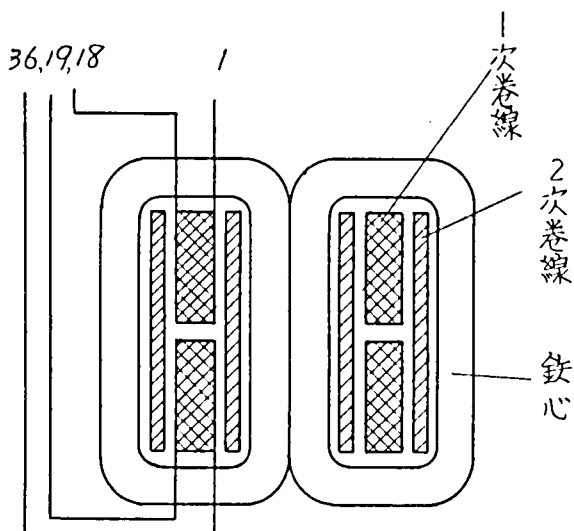
(C) 10,000 KVA 30KV/6KV 3相電力用変圧器の内部電位振動についての考察

10,000 KVA 電力用変圧器の巻線配置は第1.55 図のようであり、分布定数回路と考えられるが、同一巻線脚の上半分と下半分が互に逆巻きに並列接続してあるので、巻線脚の上下端の線路端より進行波が入ってきて中央の中性点Nに同時に両側より到達する。従ってN点に第1回の電磁的進行波が来るまでは明瞭に巻線中に進行波がみられるが、以後の反射、透過等の現象は上下端よりの進行波が入りまじって高調波の比較的少ない現象波形となってしまう。

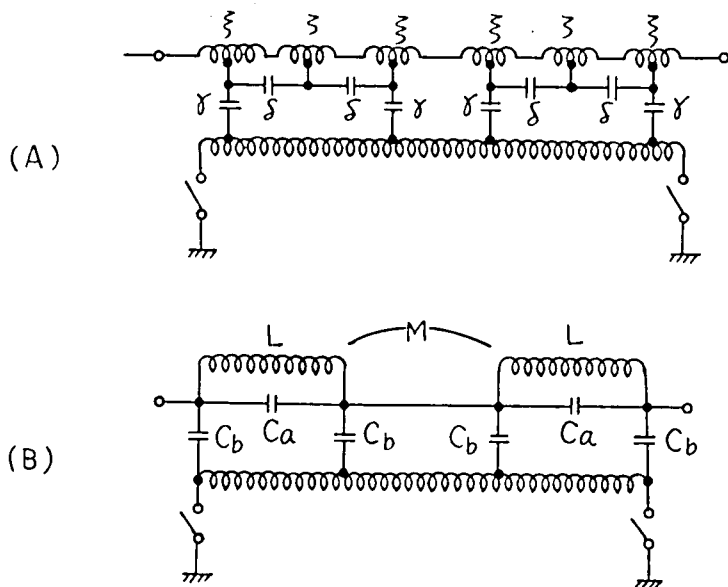
また巻線脚の上半分と下半分が並列に接続され、かつ3相が中性点Nで結ばれているので、中性点Nには相当大的な静電容量が接続されていることとなり、第1.50 図に見るように1端印加他2端接地の場合と、3相一括印加で中性点に全く同様の波形が出ている。

10,000 KVA 3相電力用変圧器の内部電位振動の波形をみると波頭の部分に小さな正パルス、続いて負のパルスがある。これは印加された衝電圧の波頭の部分で、コイル間の静電容量を通して巻線のインダクタンスを充電する状態となるので小さな振動がみられ、正パルスのおとに負のパルスが続く、このおとに導体を伝播してきた正の進行波があらわれる。この時間より巻線導体の上の進行波の伝播速度を求めると $170 \text{ m}/\mu\text{s}$ となる。

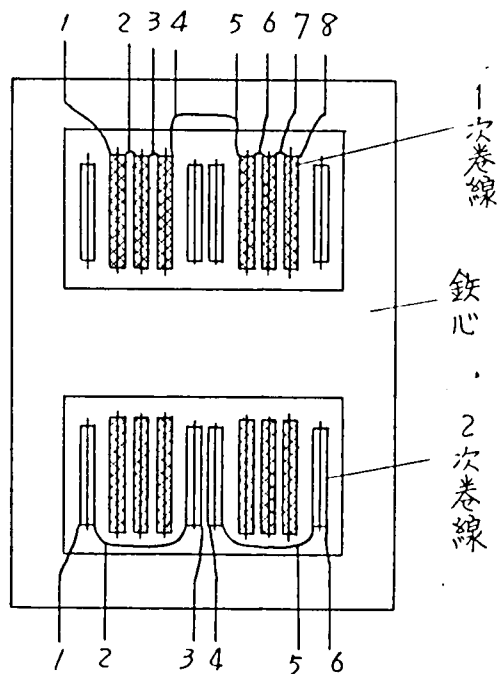
10,000 KVA 3相電力用変圧器の1次巻線の線路端子を一括接地して、中性点よりインテグラル・インピーダンスを測定したオシログラムは第1.56 図のようになり、その振動周期は $20 \mu\text{s}$ で、3相一括印加中性点非接地の内部電位振動の中性点振動周期 $23 \mu\text{s}$ と大体一致し、巻線の回路状態が両者相等しいことを示している。



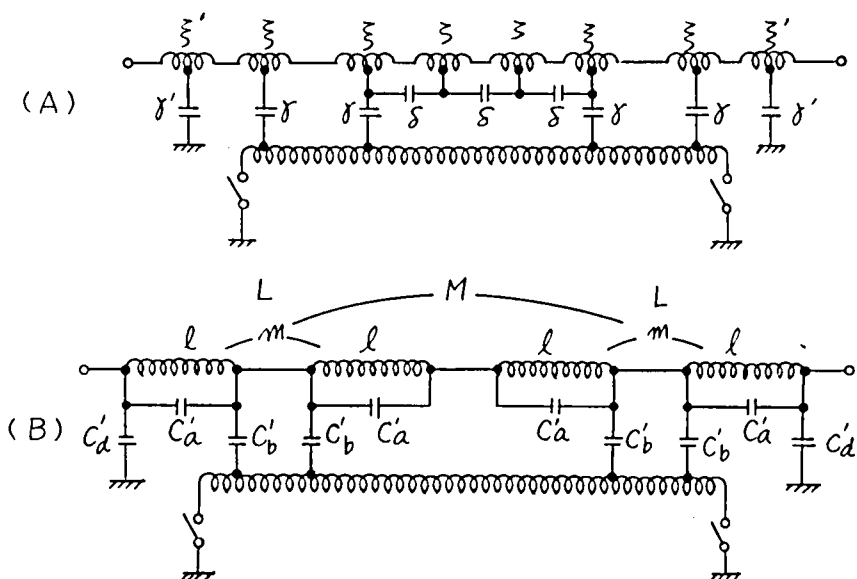
第1.51 図 10 KVA 単相巻鉄心変圧器の巻線配置



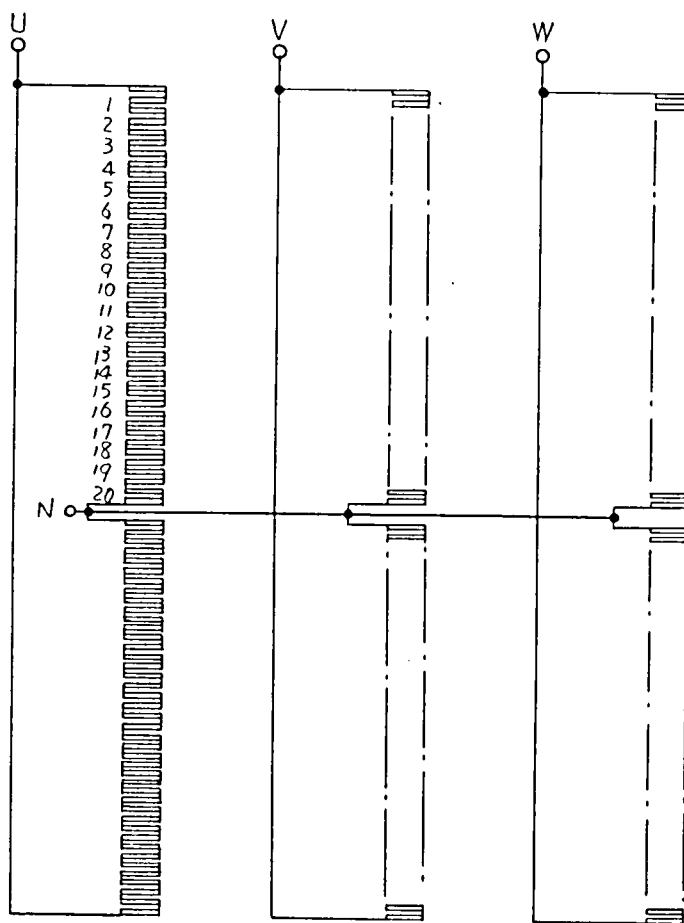
第1.52 図 10KVA 単相巻鉄心変圧器1次巻線の等価回路
(あるいは 150KVA 単相絶縁変圧器1次巻線の等価回路)



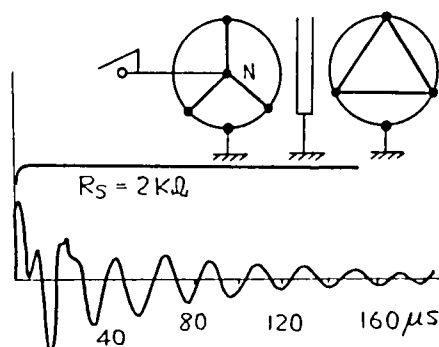
第1.53図 150 KVA 単相絶縁変圧器の巻線配置



第1.54図 150 KVA 絶縁変圧器2次巻線の等価回路



第1.55図 10,000 KVA 3相電力用変圧器の巻線配置



第1.56図 10,000 KVA 3相電力用変圧器の
インデューシャル・インピーダンス1次巻線中性点
Nより電圧を加え、線端子を一括接地 2次巻線短
絡接地

(2) 2群に分けて考え得る変圧器巻線の振動

(a) 1端印加他端接地の内部電位振動測定時の振動

第1.57図のように各定数の値および電流値をあらわし、電圧電流の式をたてると

$$pLi_1 + pMi_2 + \frac{i_3}{pCa} = 0$$

$$\frac{i_3}{pCa} - \frac{i_5}{pCb} = E \cdot H(t)$$

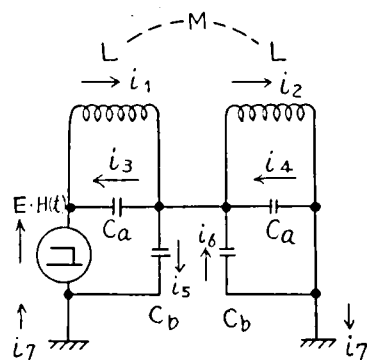
$$pMi_1 + pLi_2 + \frac{i_4}{pCa} = 0$$

$$\frac{i_4}{pCa} - \frac{i_6}{pCb} = 0$$

$$\frac{i_5}{pCb} + \frac{i_6}{pCb} = 0$$

$$i_1 - i_3 - i_5 - i_7 = 0$$

$$i_2 - i_4 - i_6 - i_7 = 0$$



第1.57図

以上の式を連立させて i_1 について解くと

$$i_1 = \left(\frac{-E}{2p(L+M)} + \frac{-ECb}{(L-M)(Ca+Cb)} \frac{p}{p^2 + \frac{1}{(L-M)(Ca+Cb)}} \right) \cdot H(t) \quad (1.9)$$

この式を t 関数に直すと、印加電圧短形波 $E \cdot H(t)$ に対して

$$i_1 = \left(-\frac{E}{2(L+M)} t - ECb \sin \beta t \right) \cdot H(t) \quad (1.10)$$

$$\text{但し } \beta = \frac{1}{\sqrt{(L-M)(Ca+Cb)}}$$

(1.10) 式中第1項は時間と共に無限に増加する項であるが、実際は巻線には抵抗があるので対数的に増加する値であり、第2項は $(L-M)$ すなわち、2群の間の漏洩インダクタンスと $(Ca+Cb)$ による振動をあらわしている。

(b) 両端一括印加の内部電位振動測定時の振動

第1.58図のように各部の定数の値および電流値をあらわし、電圧電流の式をたてると次のようになる。但し電圧の印加される両端にある Cb はインピーダンスの低い街電圧発生器と並列になるので考慮に入れなくてよいため省略した。

$$pLi_1 + pMi_2 + \frac{i_3}{pCa} = 0$$

$$\frac{i_3}{pCa} - \frac{i_5}{pCb} = E \cdot H(t)$$

$$pLi_2 + pMi_1 + \frac{i_4}{pCa} = 0$$

$$-\frac{i_4}{pCa} + \frac{i_6}{pCb} = E \cdot H(t)$$

$$i_1 - i_3 - i_5 - i_2 + i_4 + i_6 = 0$$

$$pLi_1 + pMi_2 + pLi_2 + pMi_1 = 0$$

以上を連立させて i_1 を求めると

$$i_1 = \frac{-ECb}{(L-M)(Ca+Cb)} \frac{p}{p^2 + \frac{1}{(L-M)(Ca+Cb)}} \cdot H(t) \quad (1.11)$$

この式を t 関数に直すと、印加電圧矩形波 $E \cdot H(t)$ に対して、

$$i_1 = -ECb\beta \sin \beta t \cdot H(t) \quad (1.12)$$

$$\text{但し } \beta = \frac{1}{\sqrt{(L-M)(Ca+Cb)}}$$

漏洩インダクタンスすなわち $(L-M)$ と $(Ca+Cb)$ による振動をあらわしている。

(C) 1 端印加他端開放の内部電位振動測定時の振動

第 1.59 図のように各部の定数および電流値をあらわし、電圧電流の式をたてると、

$$pLi_1 + pMi_2 + \frac{i_3}{pCa} = 0$$

$$\frac{i_3}{pCa} - i_5 \frac{1}{2pCb} = E \cdot H(t)$$

$$pLi_2 + pMi_1 + \frac{i_4}{pCa} = 0$$

$$\frac{i_4}{pCa} + \frac{i_5}{2pCb} - \frac{i_6}{pCb} = 0$$

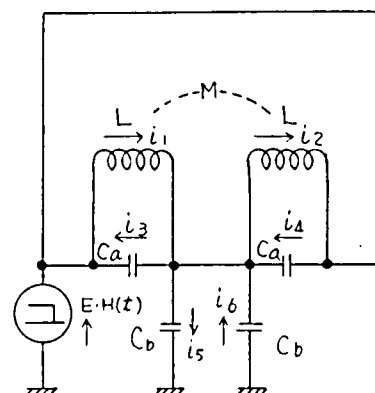
$$i_1 - i_3 - i_7 = 0$$

$$i_2 - i_4 - i_6 = 0$$

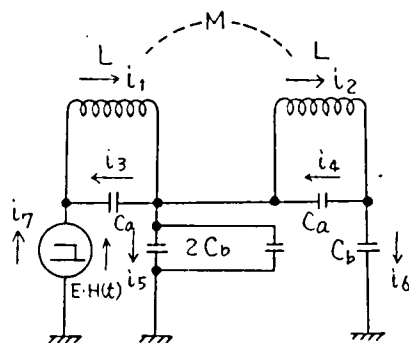
$$i_5 + i_6 - i_7 = 0$$

以上の式を連立させて i_1 について解くと、

$$i_1 = \frac{-pCbE\{3 + p^2(2CbL + 3CaL - CaM)\}}{1 + p^2(2MCb + 2CaL + 4CbL) + p^4(L^2 - M^2)(Ca^2 + 4CaCb + 2Cb^2)} \cdot H(t) \quad (1.13)$$



第 1.58 図



第 1.59 図

上式の t 関数を求めるには Heaviside の展開定理を用いるため分母 $=0$ の根を求めなければならない。すなわち

$$1 + p^2(2MC_b + 2CaL + 4C_bL) + p^4(L^2 - M^2)(C_a^2 + 4CaC_b + 2C_b^2) = 0$$

これを p^2 についての2次方程式として解くと、

$$p^2 = \frac{-(2MC_b + 2CaL + 4C_bL) \pm \sqrt{M^2(C_a^2 + 4CaC_b + 3C_b^2) + ML(2CaC_b + 4C_b^2) + L^2C_b^2}}{2(L^2 - M^2)(C_a^2 + 4CaC_b + 2C_b^2)} \quad (1.14)$$

となり、 p^2 は負の実数となることから

$$p = \pm j\beta_1, \quad \pm j\beta_2$$

とおける。従って i は2つの振動の和であることを示している。

一方分母 $=0$ の p^2 の近似解は次のようにしても求まる。

$$1 + p^2(2MC_b + 2CaL + 4C_bL) + p^4(L^2 - M^2)(C_a^2 + 4CaC_b + 2C_b^2) \\ = [1 + p^2(L+M)\{Ca + (2+\sqrt{2})C_b\}][1 + p^2(L-M)\{Ca + (2-\sqrt{2})C_b\}] + p^2MC_b(2-\sqrt{2})$$

であるから、 $p^2\{L(2Ca + 4C_b) + M(2\sqrt{2})C_b\}$ に対して、 $p^2MC_b(2-\sqrt{2})$ を無視すれば、近似的に上式の解は

$$[1 + p^2(L+M)\{Ca + (2+\sqrt{2})C_b\}][1 + p^2(L-M)\{Ca + (2-\sqrt{2})C_b\}] = 0 \quad (1.15)$$

の根となるから、近似解として次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} p &= \pm j \frac{1}{\sqrt{(L+M)\{Ca + (2+\sqrt{2})C_b\}}} = \pm j\beta_1 \\ p &= \pm j \frac{1}{\sqrt{(L-M)\{Ca + (2-\sqrt{2})C_b\}}} = \pm j\beta_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.16)$$

故に $(L+M)$ のインダクタンスと $\{Ca + (2+\sqrt{2})C_b\}$ の静電容量の振動および $(L-M)$ のインダクタンスと $\{Ca + (2-\sqrt{2})C_b\}$ の静電容量の振動が行なわれることが解る。

(d) 1端子加他端接地のインデューシャル・

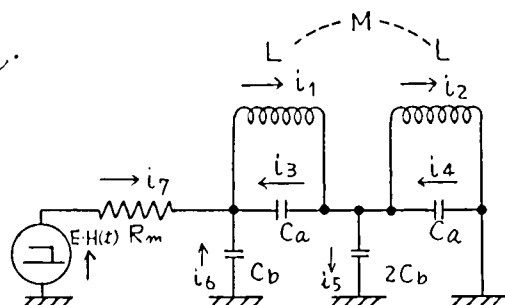
インピーダンス測定時の振動

第1.60図のように各部定数の

値および電流値をあらわし、

電圧電流の式を立てると次のよ

うになる。



第1.60図

$$pLi_1 + pMi_2 + \frac{i_3}{pCa} = 0$$

$$\frac{i_3}{pCa} - \frac{i_5}{2pCb} - \frac{i_6}{pCb} = 0$$

$$pMi_1 + pLi_2 + \frac{i_4}{pCa} = 0$$

$$\frac{i_4}{pCa} + \frac{i_5}{2pCb} = 0$$

$$\frac{i_6}{pCb} - R_m i_7 = E \cdot H(t)$$

$$i_1 - i_2 - i_3 + i_4 - i_5 = 0$$

$$i_1 - i_3 - i_6 - i_7 = 0$$

以上の式を連立させて、 i_1 について解くと

$$i_1 = \frac{\left\{1 - p^2(C_a M - C_a L - 2C_b L)\right\} \cdot \frac{-E}{R_m}}{1 + 2p \frac{L+M}{R_m} + p^2(2C_a L + 4C_b L + 2C_b M) - p^3 \frac{(L+M)^2}{R_m} (2C_b) + p^4 (L^2 - M^2)(C_a^2 + 4C_a C_b + 2C_b^2)} \cdot H(t) \quad (1.17)$$

分母の中で R_m は非常に大きいと考え、 $\frac{L+M}{R_m}$ および $\frac{(L+M)^2}{R_m}$ の項は他の項に比して小さいから無視すると、

$$i_1 = \frac{1 - p^2(C_a M - C_a L - 2C_b L)}{1 + p^2(2C_a L + 4C_b L + 2C_b M) + p^4 (L^2 - M^2)(C_a^2 + 4C_a C_b + 2C_b^2)} \left(\frac{-E}{R_m} \right) \cdot H(t) \quad (1.18)$$

この式の分母は前述 (C) の場合の i_1 の式の分母と同じであるから、近似的に $(L+M)$ のインダクタンスと $\{C_a + (2+\sqrt{2})C_b\}$ の静電容量の振動および $(L-M)$ のインダクタンスと $\{C_a + (2-\sqrt{2})C_b\}$ の静電容量の振動が行なわれることを示す。

(e) 1 端子加他端子開放のインデシヤル・インピーダンス測定時の振動

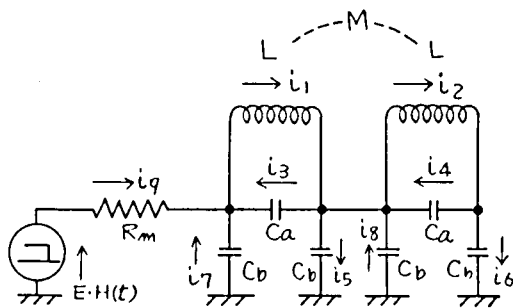
第 1.61 図のように各定数の値および電流値をあらわし、電圧電流の式をたてると

$$pLi_1 + pMi_2 + \frac{i_3}{pCa} = 0$$

$$\frac{i_3}{pCa} - \frac{i_5}{pCb} - \frac{i_7}{pCb} = 0$$

$$pMi_1 + pLi_2 + \frac{i_4}{pCa} = 0$$

$$\frac{i_4}{pCa} - \frac{i_6}{pCb} - \frac{i_8}{pCb} = 0$$



第 1.61 図

$$i_5 + i_8 = 0$$

$$\frac{i_7}{pC_b} - R_m i_9 = E \cdot H(t)$$

$$i_1 - i_2 - i_3 + i_4 - i_5 + i_8 = 0$$

$$i_1 - i_3 - i_7 - i_9 = 0$$

$$i_2 - i_4 - i_6 = 0$$

以上の式を連立させて i_1 について解くと、

$$i_1 = \frac{\left\{ -\frac{3}{pC_b} + p\left(\frac{C_a}{C_b}M - 2L - 3\frac{C_a}{C_b}L\right) \right\} \cdot \frac{-E}{R_m}}{\left\{ 1 + p\left(\frac{L}{R_m} + \frac{M}{R_m} + \frac{C_a}{C_b}\frac{M}{R_m}\right) + p^2(C_a + C_b)(L + M) \right\} \left\{ -\frac{3}{pC_b} + p\left(\frac{C_a}{C_b}M - 2L - 3\frac{C_a}{C_b}L\right) \right\} - \left\{ \frac{1}{pC_b R_m} + 1 + p\left(\frac{M}{R_m} + \frac{L}{R_m} + \frac{C_a}{C_b}\frac{M}{R_m}\right) + p^2(C_a + C_b)(L + M) \right\} \left\{ \frac{1}{pC_b} + p\left(\frac{C_a}{C_b}L - 2M - 3\frac{C_a}{C_b}M\right) \right\}} \cdot H(t) \quad (1.19)$$

分母の中で R_m は非常に大きいと考へ $\frac{1}{R_m}$ を含む項を他の項に比して無視すると、

$$i_1 = \frac{1}{4} \left\{ \frac{\frac{1}{2(C_a + C_b)(L + M)}}{\frac{1}{(C_a + C_b)(L + M)} + p^2} + \frac{\frac{1}{(C_a + \frac{C_b}{2})(L - M)}}{\frac{1}{(C_a + \frac{C_b}{2})(L - M)} + p^2} \right\} \cdot \frac{-E}{R_m} \cdot H(t) \quad (1.20)$$

これを t 関数に直すと次のようになる。

$$i_1 = \frac{1}{4} \left\{ 2(1 - \cos \beta_1 t) + (1 - \cos \beta_2 t) \right\} \cdot H(t) \quad \left. \begin{array}{l} \text{但し } \beta_1 = \frac{1}{(C_a + C_b)(L + M)} \\ \beta_2 = \frac{1}{(C_a + \frac{C_b}{2})(L - M)} \end{array} \right\} \quad (1.21)$$

すなわちこの場合 $(L + M)$ のインダクタンスと $(C_a + C_b)$ の静電容量の振動および $(L - M)$ のインダクタンスと $(C_a + \frac{C_b}{2})$ の静電容量の振動をする。

(f) 振動周波数の実測値と計算値の比較

上記(a)～(e)の結果を用いて計算した振動周波数と、インデシヤルインピーダンスあるいは内部電位振動の実測オシログラムにあらわれている振動周波数を比較すると第1.9表のようになる。

この表によると計算値と実測値は10 KVA変圧器の1次巻線については非常に良く合っている。これはその巻線構造が2群の巻線の両端に他巻線に対する静電容量が集中しており、かつ中間の巻線層が大地に対して持つ静電容量が非常に少ないためである。

第 1.9 表

		$2\pi f$ $= W$		10KVA 1次卷線		150KVA 1次卷線		150KVA 2次卷線	
				I	II	III	IV	V	VI
				2次短絡	2次開放	2次短絡	2次開放	1次短絡	1次開放
1端印加 他端接地 內部電位 振動		(1) $\frac{1}{\sqrt{(L-M)(C_a+C_b)}}$	實 L-M (H)	0.25	0.25	0.0358	0.0358	0.0047	0.0047
			實 C_a (PF)	99	99	19	19	61.8	61.8
			實 C_b (PF)	220	220	280	280	280	280
			算 C_a+C_b (PF)	319	319	299	299	341.8	341.8
			算 f (KC)	18	18	49	49	126	126
			實 f (KC)	18.2	18.9	59	59	166	166
兩端一括 印加 內部電位 振動		(2) $\frac{1}{\sqrt{(L-M)(C_a+C_b)}}$	實 L-M (H)	0.25	0.25	0.0358	0.0358	0.0047	0.0047
			實 C_a (PF)	99	99	19	19	61.8	61.8
			實 C_b (PF)	220	220	280	280	280	280
			算 C_a+C_b (PF)	319	319	299	299	341.8	341.8
			算 f (KC)	18	18	49	49	126	126
			實 f (KC)	18.2	19.6	59	59	143	166
1端印加 他端開放 內部電位 振動		(3) $\frac{1}{\sqrt{(L+M)\{C_a+(2+\sqrt{2})C_b\}}}$	實 L+M (H)	0.107	32	0.0118	4.96	0.0029	0.830
			實 C_a (PF)	99	99	19	19	61.8	61.8
			實 C_b (PF)	220	220	280	280	280	280
			算 $C_a+(2+\sqrt{2})C_b$ (PF)	849	849	979	979	1016.8	1016.8
			算 f (KC)	16.7	0.97	46.7	2.28	107.5	5.48
			實 f (KC)	15.4	/	52.5	/	111	/
		(4) $\frac{1}{\sqrt{(L-M)\{C_a+(2-\sqrt{2})C_b\}}}$	實 L-M (H)	0.25	0.25	0.0358	0.0358	0.0047	0.0047
			實 C_a (PF)	99	99	19	19	61.8	61.8
			實 C_b (PF)	220	220	280	280	280	280
			算 $C_a+(2-\sqrt{2})C_b$ (PF)	231	231	187	187	229.8	229.8
			算 f (KC)	21.0	21.0	61.4	61.4	142	142
			實 f (KC)	/	21.3	/	62.5	/	142

1端印加 他端接地		(5) $\frac{1}{\sqrt{(L+M)\{C_a+(2+\sqrt{2})C_b\}}}$	⑤ L+M (H)	0.107	32	0.0118	4.96	0.0029	0.830
			⑤ C _a (PF)	99	99	19	19	61.8	61.8
			⑤ C _b (PF)	220	220	280	280	280	280
			④ C _a +(2+√2)C _b (PF)	849	849	979	979	1016.8	1016.8
			④ f (KC)	16.7	0.83	46.7	2.28	107.5	5.48
			⑤ f (KC)	16.6	—	41.6	—	77	—
		(6) $\frac{1}{\sqrt{(L-M)\{C_a+(2-\sqrt{2})C_b\}}}$	⑤ L-M (H)	0.25	0.25	0.0358	0.0358	0.0047	0.0047
			⑤ C _a (PF)	99	99	19	19	61.8	61.8
			⑤ C _b (PF)	220	220	280	280	280	280
			④ C _a +(2-√2)C _b (PF)	231	231	187	187	229.8	229.8
			④ f (KC)	21.0	21.0	61.4	61.4	142	142
			⑤ f (KC)	—	—	—	—	—	—
1端印加 他端開放		(7) $\frac{1}{\sqrt{(L+M)(C_a+C_b)}}$	⑤ L+M (H)	0.107	32	0.0118	4.96	0.0029	0.830
			⑤ C _a (PF)	99	99	19	19	61.8	61.8
			⑤ C _b (PF)	220	220	280	280	280	280
			④ C _a +C _b (PF)	319	319	299	299	341.8	341.8
			④ f (KC)	27.2	0.83	84.4	4.11	160	9.46
			⑤ f (KC)	30.3	—	77	—	—	—
		(8) $\frac{1}{\sqrt{(L-M)(C_a+\frac{C_b}{2})}}$	⑤ L-M (H)	0.25	0.25	0.0358	0.0358	0.0047	0.0047
			⑤ C _a (PF)	99	99	19	19	61.8	61.8
			⑤ C _b (PF)	220	220	280	280	280	280
			④ C _a + $\frac{C_b}{2}$ (PF)	209	209	159	159	201.8	201.8
			④ f (KC)	22	22	66.6	66.6	163	163
			⑤ f (KC)	—	—	—	—	—	—

註1) 表中⑤は実測値を、④は実測値より算出した値を示す。

註2) 表中(3)(5)(7)の他巻線が開放である場合には非常に低い周波数の振動があらわれるが、測定したブラウン管の横軸の掃引速度の関係でオシシログラム上では高い周波数の(4)(6)(8)のみ観測されている。

第 4 節 変圧器巻線単位コイルのインデイシヤル・インピーダンス

変圧器の過渡状態における状況を知る 1 手段として、変圧器の巻線を各単位コイルに分けて、それぞれ自身のインデイシヤル・インピーダンスおよび 1 コイルに単位矩形電流を流したとき、他のコイルにあらわれる誘導電圧、すなわちレスポンスを、第 2 京大法によりインデイシヤル・インピーダンスを測定するのと同じ方法により測定し、変圧器巻線の回路の構成を検討した。

実験は簡単な回路構成の単相 50 KVA 積鉄心変圧器の 1 次 3 KV 巻線側のコイルについて行なった。この際 2 次巻線は短絡接地し、1 次巻線内の振動が最もいちじるしく起る状態について検討した。この変圧器の巻線は、内鉄型鉄心の 2 脚上に 2 次巻線をそれぞれ多層巻きした上に、1 次巻線を 6 コイルに分割して型巻きしたものを、各脚に 3 コイルづつはめ込み、これを直列接続したもので、第 1.62 図のような配置になっている。

(1) 変圧器巻線の端子インピーダンス

種々の接続につき端子インピーダンスを第 2 京大法により測定したところ、次の結果となった。

a) 1 次巻線全コイルの端子インピーダンスは第 1.63 図の如く、

$$3.58 \times 10^3 \varepsilon^{-4.4 \times 10^4 t} \sin 4.49 \times 10^5 t \cdot H(t) \Omega \text{ となり、その等価回路は第 1.64 図のようになる。}$$

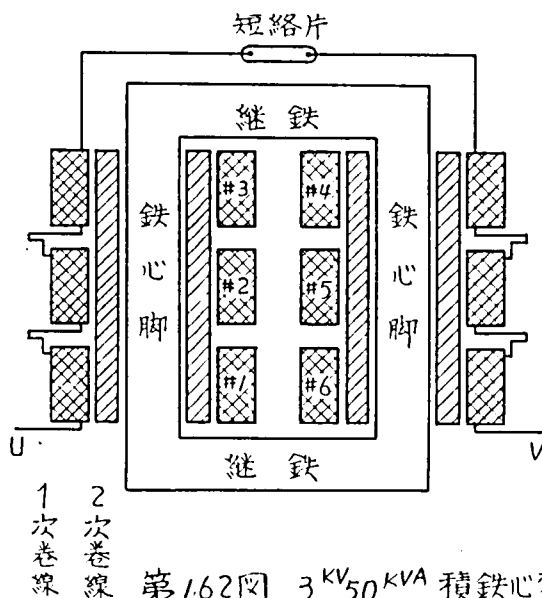
b) 1 次巻線 1 脚のみの端子インピーダンスは第 1.65 図の如く、

$$3.56 \times 10^3 \varepsilon^{-1.56 \times 10^5 t} \sin 7 \times 10^5 t \cdot H(t) \Omega \text{ となり、その等価回路は第 1.66 図のようになる。}$$

c) 各単位コイルのうち、継鉄に隣っている #1, #3, #4, #6 のコイルのインデイシヤル・インピーダンスはほとんど同一で第 1.67 図の如く、

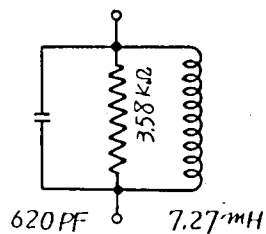
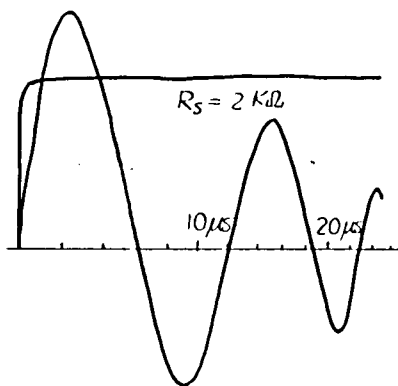
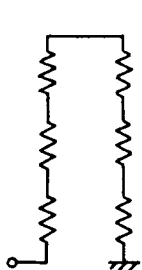
$$1.14 \times 10^3 \varepsilon^{-1.45 \times 10^5 t} \sin 6.63 \times 10^5 t \cdot H(t) \Omega \text{ となり、その等価回路は第 1.68 図のようになる。}$$

d) 各単位コイルのうち、継鉄に隣っていない #2, #5 コイルのインデイシヤル・インピーダンスは、両者ほとんど同一で第 1.69 図のようであり、



第1.62図 3 KV 50 KVA 積鉄心変圧器
のコイル配置図

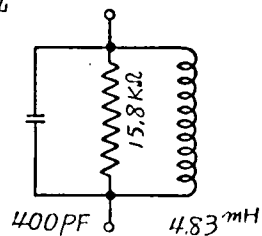
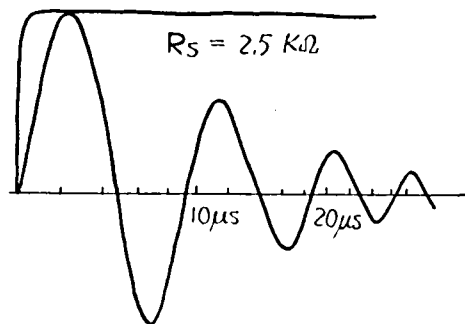
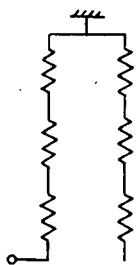
$$Z(t) = 3.58 \times 10^3 \varepsilon^{-4.4 \times 10^4 t} \sin 4.49 \times 10^5 t \cdot H(t) \Omega$$



第1.64図

第1.63図 1次巻線全体のインデイヤルインピーダンス

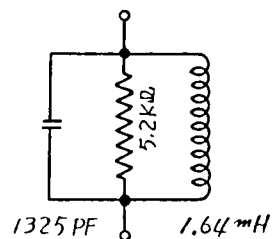
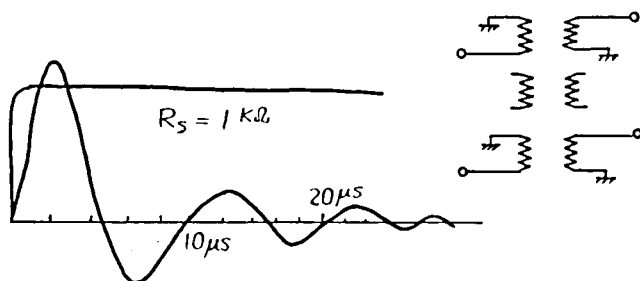
$$Z(t) = 3.56 \times 10^3 \varepsilon^{-1.56 \times 10^5 t} \sin 7 \times 10^5 t \cdot H(t) \Omega$$



第1.66図

第1.65図 1次巻線片脚のインデイヤルインピーダンス

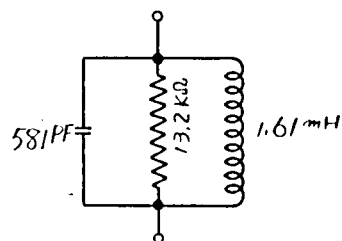
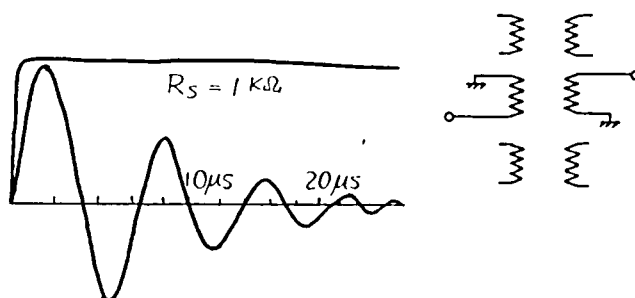
$$Z(t) = 1.14 \times 10^3 \varepsilon^{-1.45 \times 10^5 t} \sin 6.63 \times 10^5 t \cdot H(t) \Omega$$



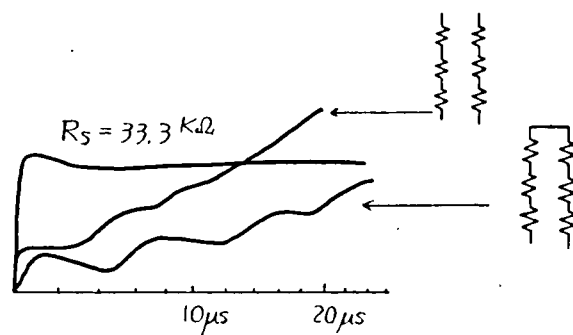
第 1.68 図

第 1.67 図 継鉄に隣っている各単位コイルの
インデイヤル・インピーダンス

$$Z(t) = 1.64 \times 10^3 \varepsilon^{-1.3 \times 10^5 t} \sin 1.05 \times 10^6 t \cdot H(t) \Omega$$



第 1.70 図

第 1.69 図 継鉄に隣っていない各単位コイルの
インデイヤル・インピーダンス

第 1.71 図 他端非接地の場合の巻線のインデイヤル・インピーダンス

$1.64 \times 10^3 \varepsilon^{-1.3 \times 10^5 t} \sin 1.05 \times 10^6 t \cdot H(t) \Omega$ となり、その等価回路は第 1.70 図のようになる。

e) 各コイルおよびその種々の接続に対して、他端非接地の状態で、1 端よりみたインデイヤル・インピーダンスを第 2 京大法により測定し、その巻線のサージ・インピーダンス、巻線中の進行波の伝播速度およびコイルの終局静電容量を求めた。そのオシログラムの 1 例を第 1.71 図に、その結果を第 1.10 表に示す。

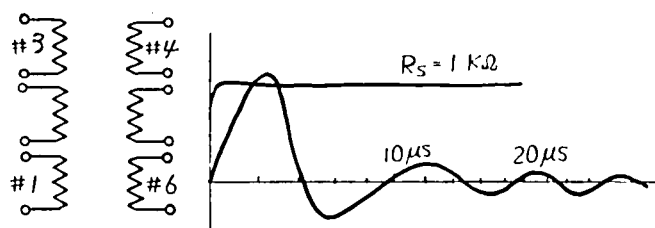
第 1.10 表

コイル接続	電圧印加端子	終局静電容量	サージ・インピーダンス	伝播速度
両脚	両端一括印加	1150 PF	4 k Ω	200 m/ μ s
	U 端印加	970 "	8 "	200 "
	V 端印加	970 "	8 "	
片脚	U 脚単独	680 "	8 "	170 "
	V 脚単独	696 "	7 "	170 "
単位コイルのみ	単位コイル #1	360 "	12 "	
	" #2	340 "	10 "	
	" #3	340 "	12 "	
	" #4	340 "	12 "	
	" #5	340 "	10 "	
	" #6	340 "	12 "	

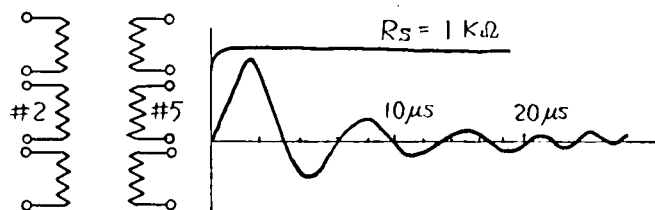
(2) 変圧器巻線の各単位コイル間の結合

各単位コイル間の結合を知るために、コイル相互間の接続をはずして、第 2 京大法によるインデイヤル・インピーダンスの測定と同一の回路により、1 コイルに矩形波電流を流したとき、他コイルにあらわれる電圧を高速度ブラウン管により測定して、結合インピーダンスを求めた結果、第 1.72 図を得た。

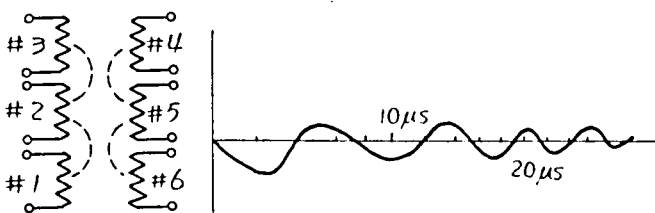
第 1.72 図より次のことが解る。



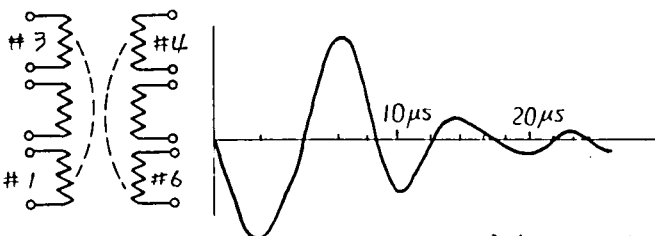
(A) 継鉄に隣った単位コイルのインデシヤルインピーダンス



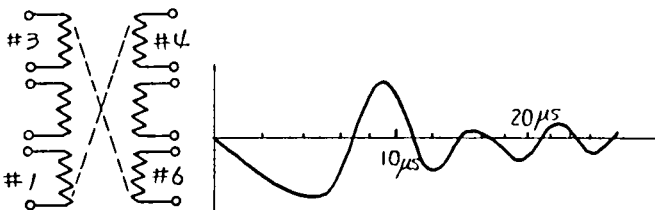
(B) 継鉄に隣らぬ単位コイルのインデシヤルインピーダンス



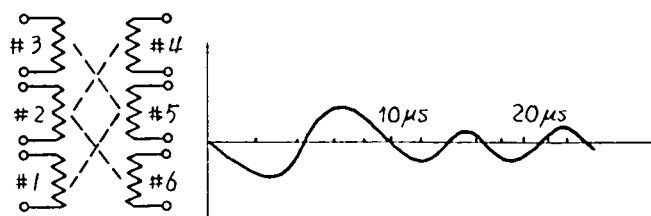
(C) 同一脚で隣り合ったコイルの結合インピーダンス



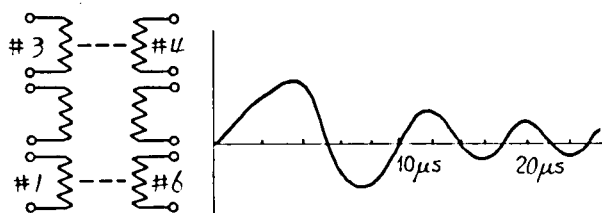
(D) 同一脚で1つ離れたコイルの結合インピーダンス



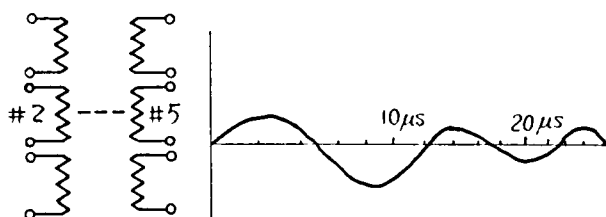
(E) 異った脚で1つ飛んで向いあったコイルの結合インピーダンス



(F) 異った脚で斜に向い合ったコイルの結合インピーダンス



(G) 異った脚で継鉄の隣りで向い合ったコイルの結合インピーダンス



(H) 異った脚で継鉄よりはなれて向い合ったコイルの結合インピーダンス

第1.73図 単位コイルの結合インピーダンス

a) 幾何学的に同一関係位置にあるコイル相互間の結合インピーダンスは同一である。

すなわち、今の場合インピーダンス・オシログラムは第1.73図(A)(B)の自己インデシヤル・インピーダンスと、(C)(D)(E)(F)(G)(H)の結合インピーダンスの8種類である。

b) 異った脚の同一位置にある、すなわち向い合つたコイル、すなわち#1と#6 (インピーダンスG), #3と#4 (インピーダンスG), #2と#5 (インピーダンスH), 相互間の結合は静電誘導による結合の方が、相互誘導による結合よりいちじるしく大となっている。

c) 同一脚の3ケのコイルのうち、1つ飛んで先のコイル同志#1と#3, および#4と#6の間の結合は、相互誘導による結合の方が、静電容量による結合よりいちじるしく大である。(インピーダンスD)

d) 異った脚の間で、斜めに1つ飛んで先のコイル間すなわち#1と#4, および#6と#3 (インピーダンスE)の結合は、相互誘導による結合の方が、静電容量による結合よりいちじるしく大である。またこれは(c)項インピーダンスDよりは小さく、他脚への相互誘導はその脚自身内の相互誘導より小さいことを示している。

e) 同一脚上で隣り合つたコイル相互間、すなわち#1と#2, #2と#3, #4と#5, #5と#6間の結合(インピーダンスC)は、1つ飛んで隣のコイル間の結合(インピーダンスD)より小さく、相互誘導性ではあるが静電容量により、かなり打ち消されていることを示している。

f) 他の脚で斜に向き合つたコイル、すなわち#1と#5, #4と#2, #2と#6相互間の結合(インピーダンスF)は、他脚で1つ飛んで斜に向き合つたコイル間の結合(インピーダンスE)より小さく、相互誘導性ではあるが、静電誘導によりかなり打ち消されていることを示している。

g) 以上の各項を検討すると、他脚で向い同志の静電誘導の方が、同一脚上隣同志のコイル間の静電誘導よりいちじるしく大きい。

h) #1, #3, #4, #6のコイルは、同一回路定数、すなわち同一共振周波数をもっていると考えられるので、それら相互間の結合インピーダンスは、

$\varepsilon^{-\alpha_1 t} - \varepsilon^{-\alpha_2 t}$ を包絡線にもつその共振周波数の振動インピーダンスとなる。

(3) 変圧器巻線の等価回路

以上の事柄より等価回路を考えると、各単位コイルの接続をはずして、それぞれの結合インピーダンスを測定したときの等価回路は第1.74図のようであり、従つて変圧器として各単位コイルの接続してある場合の等価回路は第1.75図のようになる。

しかし、ここで、今までのデータより、単位コイル間の静電容量および相互誘導を求むるには種々検討を要するので、取りあえずこれらを省略した場合の等価回路をおげると、第1.76図のようになる。

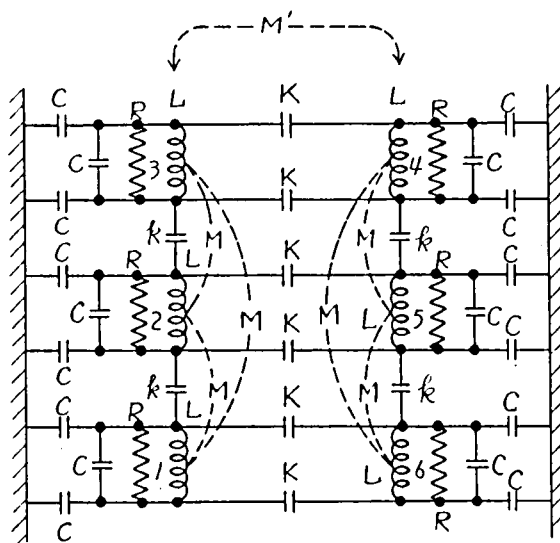
この等価回路では(1)項(e)で求めた単位コイルの静電容量がコイルに均一に分布していると考え、その $\frac{1}{2}$ を(1)項(c)および(d)で求めた単位コイル等価回路中の静電容量より引いたものが、インダクタンスと並列にあると考え、変圧器全体の等価回路を求めた。

第1.76図の静電容量の部分のみを取り上げて初期電位分布を求めると第1.77図のようになり、実現値と余り良く一致していない。これは等価回路の不備によるものと思われる。

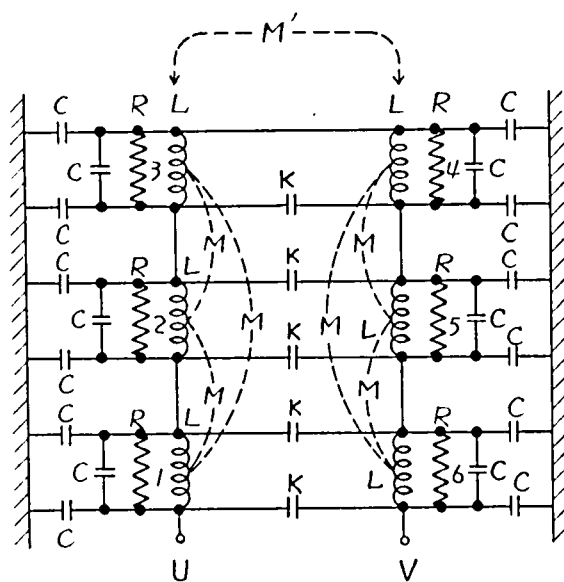
第1.76図の等価回路と片脚、すなわち3コイルのみの等価回路第1.66図を比較すると、しはほとんど一致するが、第1.76図の等価回路でCのみを考えた場合の合成静電容量は770PFとなり、第1.66図の $C = 400\text{ PF}$ と一致しない。

第1.76図の等価回路と、変圧器の巻線全体の等価回路第1.64図と比較すると、しのみでは第1.76図では9.8mHとなり、第1.64図の7.27mHと一致せず、Cのみを考えた場合、第1.76図では合成の容量が521PFとなり、第1.64図の620PFとの差は前の場合より少なくなる。

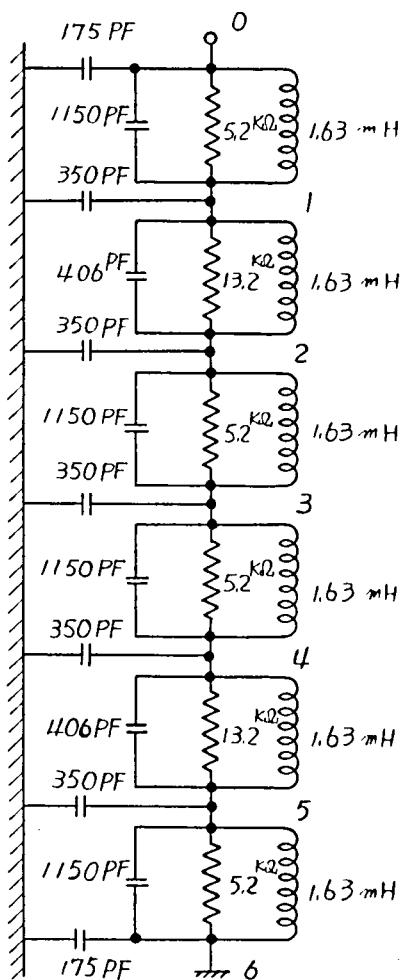
各コイル間の静電容量および相互誘導を求めることは、理論的、實際的に難しいが、コイル内部の振動状態を明らかにするためには大切なことで、今後の研究が必要である。



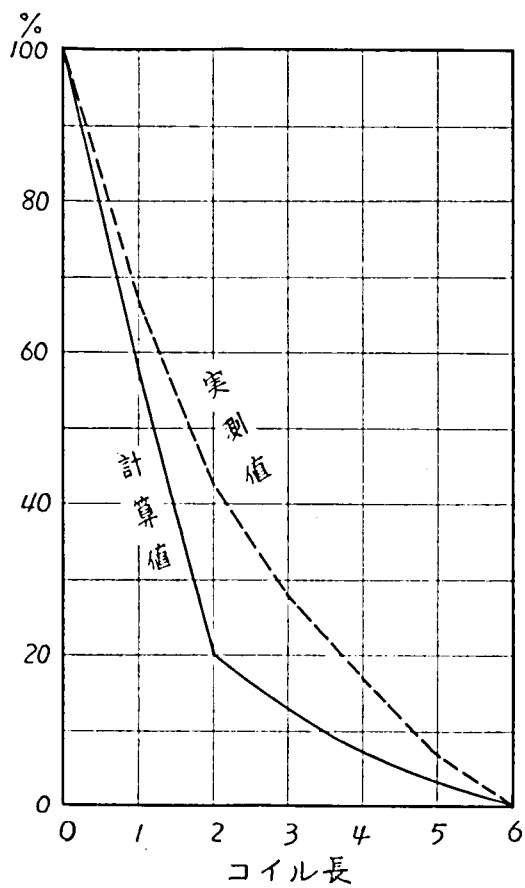
第1.74図 単位コイル相互間の結合インピーダンス
測定時の等価回路



第1.75図 50 KVA 変圧器巻線の等価回路



第1.76図 50 KVA 単相
変圧器の簡略等価回路



第1.77図 初期電位分布

第 5 節 結 言

以上第1章においてはまず変圧器のインデシヤル・インピーダンスを第2京文法により測定してその等価回路を求め、一方内部電位振動を測定して前者との関連を考察し、最後に内部電位振動を考察するため巻線を単位コイルに分割してインデシヤル・インピーダンスを測定し、その内部の等価回路を検討した。その結果をまとめると次のようになる。このうち特に(6)(9)(10)(11)(12)項は注目すべき事柄である。

- 1) 変圧器巻線のインデシヤル・インピーダンスは1端印加他端接地の接続では、振動的あるいは対数的なインデシヤル・インピーダンスをもつた回路1つまたは2つを直列接続したものによりあらわされる。
- 2) 変圧器巻線は、1端印加他端開放でも両端一括印加でも静電容量としてはたらし、これに小さな振動が重畳することがある。
- 3) 変圧器の1次巻線のサージ・インピーダンスは $2.5 \text{ K}\Omega \sim 8 \text{ K}\Omega$ の値を示す。
- 4) 変圧器1次巻線中の進行波の伝播速度は $100 \sim 200 \text{ m}/\mu\text{s}$ で、変圧器構造および巻線の接続状態によって異なる。
- 5) 変圧器の他巻線が短絡接地してある場合は、開放非接地の場合に比べて印加巻線のインダクタンスが減るためサージインピーダンスは小に、伝播速度は大になる。
- 6) 変圧器巻線インデシヤル・インピーダンスは、振動的または対数的となる時間の前に、巻線のサージ・インピーダンスを示す部分がある。この部分は進行波現象を行っている時期を示し、この時期以後は変圧器は集中定数回路と考えて差しつかえない。

またインデシヤル・インピーダンスがサージ・インピーダンスを示している時間は変圧器の構造および巻線接続により異なり、大きな変圧器で巻線が均一な配置でしかも巻線長の長い場合に顕著にあらわれる。

- 7) この変圧器インデシヤル・インピーダンスの等価回路の L_t は 60 Gs の漏洩インダクタンスとほとんど一致し、等価回路の C_t は 60 Gs で測定した

各巻線および大地間静電容量の組合せより計算したものと近い。

- 8) 巻線の1端印加他端接地の場合のインデシヤル・インピーダンスの振動周期と、1端印加他端開放の場合の内部電位振動測定時の開放端の振動周期とはほぼ同一である。
- 9) 巻線構造より、巻線を2群に分けて考え得る変圧器において、その巻線内の電圧電流の振動を考察するにあたり、集中定数回路として取扱う計算式を求めた。この計算式は特に柱上変圧器の如く、明らかに各単位コイルの両端に静電容量が集中している構造の巻線の振動については非常に良く適合することがわかった。
- 10) 単相 50 KVA 配電用変圧器の1次巻線を構成する単位コイル同志の接続をはずして、インデシヤル・インピーダンスを測定した結果より各単位コイルのインデシヤル・インピーダンス、および単位コイル間の結合インピーダンスについては、幾何学的位置が相等しいものは互に等しい。
- 11) 上記 50 KVA 変圧器の1次巻線の単位コイルの相互間の結合インピーダンスは、隣り合っているものは相互誘導の外に静電誘導が相当大きくさいている。
- 12) 上記 50 KVA 変圧器の1次巻線の単位コイル間の結合インピーダンスは、すなわち相互誘導および静電誘導はかなり大きく、これを無視した等価回路では初期電位分布の計算値は実測値と若干のひらきがある。

第 2 章 変圧器を接続した模擬送電線の過渡特性

第 1 節 緒 言

送配電線に変圧器を接続したものの総合的な過渡特性を知ることが、送配電線の異常電圧現象を解明しその防護対策を樹立する上に必要不可欠からざることである。

実際の営業線路を用いて実験することは電力の供給を一時停止する必要がある、かつ営業線路は分岐線あるいは変圧器等が非常に複雑に分布しているので現象を解析することは困難である。また新たに特性の均一な実験用線路を設備することは至費および日時を要する。よつて第2章では模擬送電線を送配電線の代りに使用し、これに実際の変圧器、単相 10 KVA 6 kV / 210 V 配電用変圧器または 150 KVA 6 kV / 3 kV 絶縁変圧器を接続して、送配電線に変圧器を接続したときの実験を模擬して行なつた。

はじめに矩形波電流を強制的に流入させる第2章文法により種々の過渡特性を検討した。まず模擬送電線のみの進行波特性を検討し、次に前述第1章でその等価回路を明らかにした変圧器を模擬送電線に接続してその総合的な過渡特性を検討した。

まず模擬送電線上の進行波の往復時間と比して、振動周期の長い 10 KVA 6 kV / 210 V 配電用変圧器の1次巻線を模擬送電線に接続して、総合的な過渡特性を検討した。次に模擬送電線上の進行波の往復時間とほとんど等しい振動周期をもつ 150 KVA 6 kV / 3 kV 絶縁変圧器の2次巻線を接続して、その総合的な過渡特性を検討した。さらに模擬送電線の長さは一定のまま、その終端に接続する 10 KVA 配電用変圧器の個数を増した場合、あるいは模擬送電線の終端に 10 KVA 配電用変圧器をつなぎ模擬送電線の長さを変化した場合について、その総合的な過渡特性を検討した。

また模擬送電線の途中に数個の 10 KVA 配電用変圧器、あるいは 150 KVA 絶縁変圧器が分布している場合の過渡特性を検討した。

さらに第1章で求めた変圧器の等価回路を別個の C, L, R により造つたものを

模擬送電線に接続して、その過渡特性を求めることにより、かかる場合第2京太法で求めたインデイシャル・インピーダンスをもつ等価回路の実用性をたしかめた。

以上は第2京太法によるインデイシャル・インピーダンスを測定する方法により過渡特性を求めたが、さらに実際に近い雷害を受けた場合、あるいは送配電線が雷害をうけたために減衰振動を発生した場合を考えて、標準衝電圧($1 \times 30 \mu\text{s}$)または減衰振動電圧を印加することにより、上記の種々の場合につきその過渡特性を矩形波電流を加えた場合と比較検討した。

以下順を追って記述する。

第 2 節 模擬送電線および変圧器の過渡特性

(1) 模擬送電線の過渡特性

模擬送電線の構造は第 2.1 図のように絶縁物の棒(木製, 直径 1 cm)の上に直径 0.45 mm の絹巻線を密に一重のソレノイドに巻き、その上に薄い銅板を長く添わせ、全体を内径 1.65 cm の銅パイプの中に入れたものであり、これを 30 本まで任意に接続することができる。

1 本の長さは 1.1 m とし、1 本をさらに 5 つの区間に分けて中間端子を取出してある。実験の結果、波動インピーダンスは 900Ω 、伝播速度は $4.1 \text{ m}/\mu\text{s}$ で、伝播の特性は非常に良好である。⁽¹⁸⁾

実験値より定数を逆算すると、

$$\text{波動インピーダンス} \quad Z = \sqrt{\frac{L_u}{C_u}} = 900 \Omega$$

$$\text{伝 播 速 度} \quad v = \frac{1}{\sqrt{L_u C_u}} = 4.1 \text{ m}/\mu\text{s}$$

$$\text{よ} \quad C_u = 2.69 \text{ PF}/\text{cm}$$

$$L_u = 2.2 \text{ } \mu\text{H}/\text{cm}$$

30 本使用したときは

$$C_o = 30 \times 110 \times 2.69 = 8900 \text{ PF}$$

$$L_o = 7260 \text{ } \mu\text{H}$$

なお、1 本当りの直流抵抗を概算すると

$$R_u = 9.4 \Omega$$

従って 30 本直列に接続したときは、全抵抗は

$$R_o = 282 \Omega$$

である。

試験に当っては、第 2.2 図のようなサイラトロンを用いた低い電圧の繰返し衝撃電圧発生装置を試験電源として用い、観測にはその繰返し衝撃電圧発生装置よりのパルスにより起動するシンクロスコープ(岩崎通信機製 SS501 型)を使用した。

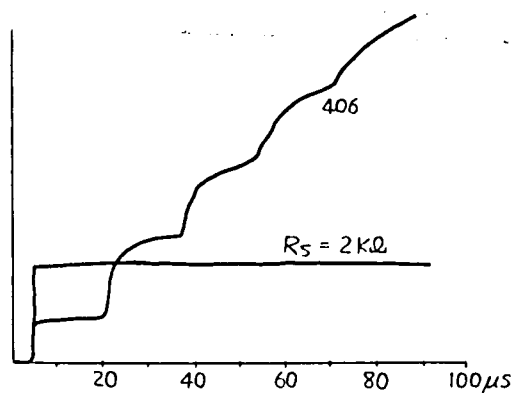
模擬送電線を 30 本使用し、両端にそのサージインピーダンスに等しい 900Ω の抵抗を入れて無反射とした場合の波形は第 2.3 図に示すようにきれいな矩形波となる。

線路の印加端に 900Ω の抵抗を入れ無反射にし、線路終端を開放にした場合、印加端の波形は第 2.4 図、線路終端の波形は第 2.5 図に示す如くである。第 2.4 図は線路終端にて正の全反射をして印加端に返ったサージが印加波形に重畳しているもので、この間の時間は線路の伝播時間 T の 2 倍である。これより線路の伝播時間 T は $8\mu\text{s}$ とわかる。印加波と反射波の高さはほとんど同一であることから、この線路の減衰はわずかであるといえる。ただし波形の変歪が見られる。⁽¹⁾⁽⁶⁾ 第 2.5 図では第 2.4 図に比べてなお変歪が多いように見られる。これは線路端に測定線をつなぐための影響と考えられる。

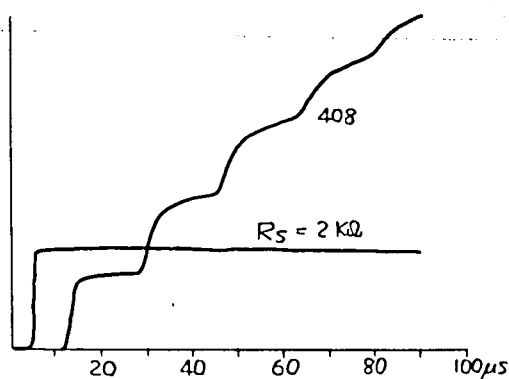
また第 2.4 図の階段部の傾斜より、線路の静電容量は約 9000PF なることがわかる。

次に第 2 章大法により模擬送電線のインデイシャルインピーダンスを測定した。

第 2.6 図は線路 30 本を使用し、線路終端を開放したときの印加端のインデイシャルインピーダンス、第 2.7 図はこれに対する線路終端の波形である。印加端では正反射が $2T$ の間隔をおいて次々と重畳してくる。また変歪の度合も反射の度毎に相乗される。この波形の階段部の底の角を連ねると、ほぼ直線的に上昇しており、印加端、線路終端の反射係数は $+1$ であることがわかる。



第 2.6 図



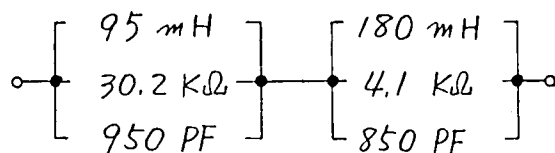
第 2.7 図

(2) 変圧器の過渡特性

実際の変圧器を模擬送電線に接続し過渡特性を求めるに際し、先に第1章第2節にて算出した10 KVAおよび150 KVAの変圧器のインディシャルインピーダンスを再録する。

10 KVA 6KV/210V 単相巻鉄心変圧器

1次巻線1端印加他端接地 2次巻線短絡接地

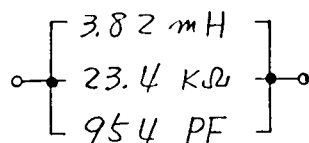


1次巻線1端印加他端接地 2次巻線開放非接地
380 PF

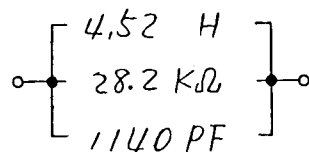
1次巻線両端一括印加 2次巻線短絡接地
660 PF

150 KVA 6KV/3KV 単相絶縁変圧器

2次巻線1端印加他端接地 1次巻線短絡接地



2次巻線1端印加他端接地 1次巻線開放非接地



2次巻線両端一括印加 1次巻線短絡接地
1200 PF

前述した如く1端印加他端接地他巻線短絡接地の場合のみ振動が起り、その他の場合はほぼ同様に発散的である。

第 3 節 模擬送電線の終端に変圧器を接続した場合の過渡特性

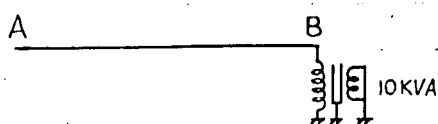
(1) 模擬送電線の終端に 10KVA 変圧器を接続した場合の過渡特性

(a) 変圧器の接続を 1 次巻線 1 端印加他端接地 2 次巻線短絡接地とした場合

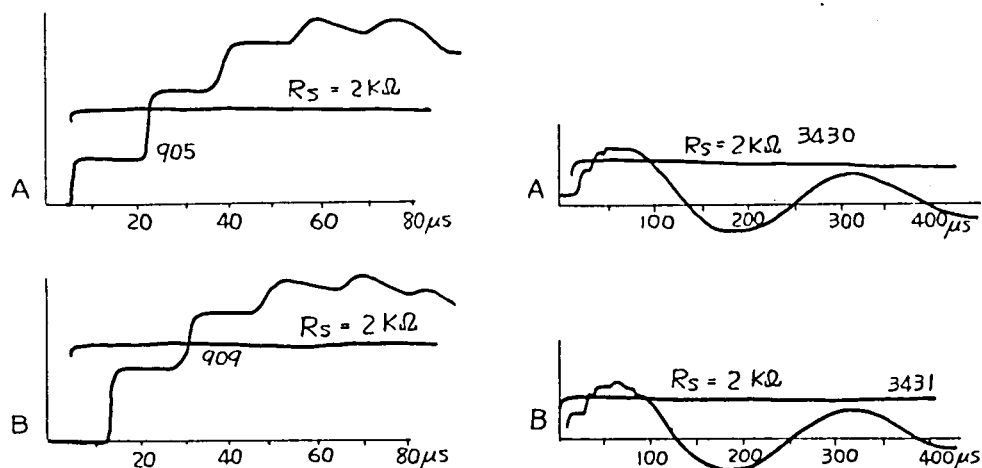
第 2.8 図の印加端 (A) のインデシヤルインピーダンス波形およびこれに対する変圧器端 (B) の電圧波形を第 2.9 図に示す。

これらの波形は、当初は進行波の往復反射現象としてあらわれ、時間経過後は減衰振動となっている。

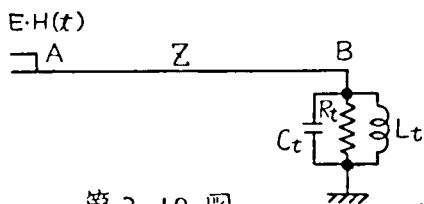
まず当初の進行波の往復反射現象について考察する。この場合第 2.10 図の如く変圧器は第 1 章第 2 節で求めたように C_t , R_t , L_t の並列回路となり、模擬送電線の始端 (A) に矩形波 $E \cdot H(t)$ が印加されると往復反射が起りその格子図は第 2.11 図のようになる。



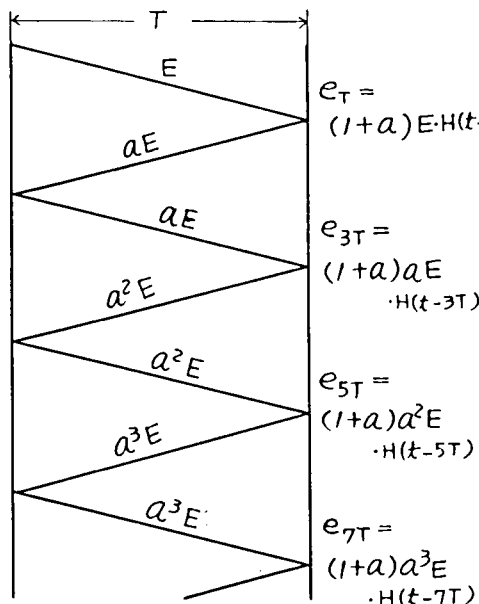
第 2.8 図



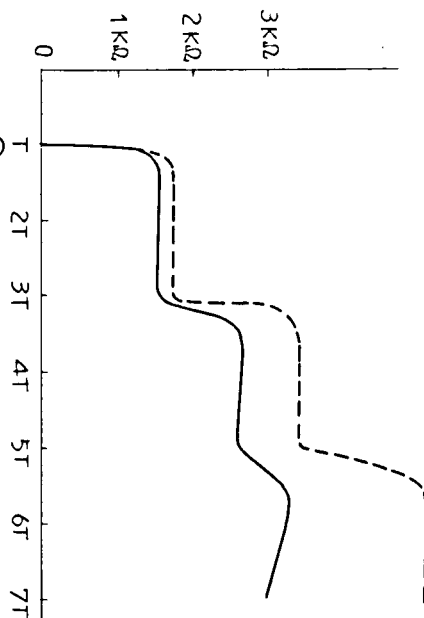
第 2.9 図



第2.10図



第2.11図



第2.12図

模擬送電線のサージインピーダンスを Z ，変圧器のインピーダンスを $Z_t(p)$ とすると変圧器での反射係数 a は次のようになる。

$$a = \frac{Z_t(p) - Z}{Z_t(p) + Z} = \frac{\frac{pL_t R_t}{p^2 C_t L_t R_t + pL_t + R_t} - Z}{\frac{pL_t R_t}{p^2 C_t L_t R_t + pL_t + R_t} + Z} = -\frac{p^2 C_t L_t R_t Z + pL_t Z + R_t Z - pL_t R_t}{p^2 C_t L_t R_t Z + pL_t Z + R_t Z + pL_t R_t}$$

$$= -\frac{(p-\alpha)^2 - \beta^2}{(p+\alpha)^2 - \beta^2} \quad \text{ただし} \quad \alpha = \frac{R_t + Z}{2C_t R_t Z} \quad \beta = \sqrt{\alpha^2 - \frac{1}{C_t L_t}}$$

また模擬送電線の印加端(A)は高抵抗で繰返し衝撃電圧発生装置に接続されているから、開放端とみなされて正の全反射が行われると考えられる。従つて変圧器端(B)にあらわれる電圧は次のようになる。

$$e = e_T + e_{3T} + e_{5T} + \dots$$

$$= (1+a)EH(t-T) + (1+a)aEH(t-3T) + (1+a)a^2EH(t-5T) \dots$$

$$e_T = (1+a)EH(t-T)$$

$$= \frac{E}{C_t Z \beta} \left\{ \varepsilon^{-(\alpha-\beta)(t-T)} - \varepsilon^{-(\alpha+\beta)(t-T)} \right\} \cdot H(t-T)$$

$$e_{3T} = (1+\alpha)\alpha EH(t-3T)$$

$$= \frac{E}{C_t Z \beta} \left\{ \varepsilon^{-(\alpha-\beta)(t-3T)} \left\{ -1 + \frac{2\alpha^2}{\beta^2} - \frac{2\alpha(\alpha-\beta)(t-3T)}{\beta} \right\} - \varepsilon^{-(\alpha+\beta)(t-3T)} \left\{ -1 + \frac{2\alpha^2}{\beta^2} + \frac{2\alpha(\alpha-\beta)(t-3T)}{\beta} \right\} \right\} \cdot H(t-3T) \quad (2.1)$$

$$e_{5T} = (1+\alpha)\alpha^2 EH(t-5T)$$

$$= \frac{E}{C_t Z \beta} \left\{ \varepsilon^{-(\alpha-\beta)(t-5T)} \left\{ 1 - \frac{6\alpha^2}{\beta^2} + \frac{6\alpha^4}{\beta^4} + 2\alpha \left(-2 + \frac{3\alpha}{\beta} + \frac{2\alpha^2}{\beta^2} - \frac{3\alpha^2}{\beta^3} \right) (t-5T) + \frac{2\alpha^2}{\beta^2} (\alpha-\beta)^2 (t-5T)^2 \right\} - \varepsilon^{-(\alpha+\beta)(t-5T)} \left\{ 1 - \frac{6\alpha^2}{\beta^2} + \frac{6\alpha^4}{\beta^4} + 2\alpha \left(-2 - \frac{3\alpha}{\beta} + \frac{2\alpha^2}{\beta^2} + \frac{3\alpha^3}{\beta^3} \right) (t-5T) + \frac{2\alpha^2}{\beta^2} (\alpha+\beta)^2 (t-5T)^2 \right\} \right\} \cdot H(t-5T)$$

この場合、各定数の値は次のようである。(第1章第2節参照)

$$T = 8\mu s, \quad Z = 900\Omega, \quad C_t = 450PF, \quad R_t = 34.3K\Omega, \quad L_t = 275mH$$

$$\alpha = \frac{R_t + Z}{2C_t R_t Z} = \frac{900 + 34.3 \times 10^3}{2 \times 450 \times 10^{-12} \times 900 \times 34.3 \times 10^3} = 1.29 \times 10^6$$

$$\beta = \sqrt{\alpha^2 - \frac{1}{L_t C_t}} = \sqrt{1.66 \times 10^{12} - 8.1 \times 10^9} = 1.286 \times 10^6 \approx \alpha$$

であるので(2.1)式で $\alpha = \beta$ とおくと次式となる。

$$\left. \begin{aligned} e_T &= \frac{E}{C_t Z \alpha} (1 - \varepsilon^{-2\alpha(t-T)}) \cdot H(t-T) \\ e_{3T} &= \frac{E}{C_t Z \alpha} \left\{ 1 - \varepsilon^{-2\alpha(t-3T)} (1 + 4\alpha(t-3T)) \right\} \cdot H(t-3T) \\ e_{5T} &= \frac{E}{C_t Z \alpha} \left\{ 1 - \varepsilon^{-2\alpha(t-5T)} (1 + 8\alpha^2(t-5T)^2) \right\} \cdot H(t-5T) \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

(2.2)式に上記各定数の値を入れて計算した結果を第2.12図の実線で示す。なお印加した電流は矩形波で、また $E = IZ$ であるから図では電圧を電流で除した値、すなわちインピーダンスとして示した。

図より示すように計算値(実線)は実測値(実線)より相当大である。これは模擬送電線中を進行波が伝播するときの減衰を考えなかったためで、この減衰については、コロナ臨界電圧以下で且線路の漏洩コンダクタンス G を無視できると減衰定数 k は次式で示される。⁽¹⁾

$$k = \frac{1}{2} \frac{R_u}{L_u}$$

ここに R_u は模擬送電線の単位長当りの直流抵抗、 L_u は同じく単位長当りのインダクタンスである。

すなわち、長さ l の線路を伝播速度 v で通過すると $\varepsilon^{-k \frac{l}{v}}$ の減衰を受けるから(2.1)式および(2.2)式の各項に減衰を考慮すると次のようになる。

$$\begin{aligned}
 e_T &= \frac{E}{C_t Z \beta} \left\{ \varepsilon^{-(\alpha-\beta)(t-T)} - \varepsilon^{-(\alpha+\beta)(t-T)} \right\} \varepsilon^{-k \frac{\ell}{v}} \cdot H(t-T) \\
 e_{3T} &= \frac{E}{C_t Z \beta} \left\{ \varepsilon^{-(\alpha-\beta)(t-3T)} \left\{ -1 + \frac{2\alpha^2}{\beta^2} - \frac{2\alpha(\alpha-\beta)(t-3T)}{\beta} \right\} \right. \\
 &\quad \left. - \varepsilon^{-(\alpha+\beta)(t-3T)} \left\{ -1 + \frac{2\alpha^2}{\beta^2} + \frac{2\alpha(\alpha-\beta)(t-3T)}{\beta} \right\} \right\} \varepsilon^{-k \frac{3\ell}{v}} \cdot H(t-3T) \\
 e_{5T} &= \frac{E}{C_t Z \beta} \left\{ \varepsilon^{-(\alpha-\beta)(t-5T)} \left\{ 1 - \frac{6\alpha^2}{\beta^2} + \frac{6\alpha^4}{\beta^4} + 2\alpha \left(-2 + \frac{3\alpha}{\beta} + \frac{2\alpha^2}{\beta^2} - \frac{3\alpha^3}{\beta^3} \right) (t-5T) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{2\alpha^2}{\beta^2} (\alpha-\beta)^2 (t-5T)^2 \right\} - \varepsilon^{-(\alpha+\beta)(t-5T)} \left\{ 1 - \frac{6\alpha^2}{\beta^2} + \frac{6\alpha^4}{\beta^4} + 2\alpha \left(-2 - \frac{3\alpha}{\beta} + \frac{2\alpha^2}{\beta^2} + \frac{3\alpha^3}{\beta^3} \right) (t-5T) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{2\alpha^2}{\beta^2} (\alpha+\beta)^2 (t-5T)^2 \right\} \right\} \varepsilon^{-k \frac{5\ell}{v}} \cdot H(t-5T)
 \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned}
 e_T &= \frac{E}{C_t Z \alpha} (1 - \varepsilon^{-2\alpha(t-T)}) \varepsilon^{-k \frac{\ell}{v}} \cdot H(t-T) \\
 e_{3T} &= \frac{E}{C_t Z \alpha} \left\{ 1 - \varepsilon^{-2\alpha(t-3T)} \left\{ 1 + 4\alpha(t-3T) \right\} \right\} \varepsilon^{-k \frac{3\ell}{v}} \cdot H(t-3T) \\
 e_{5T} &= \frac{E}{C_t Z \alpha} \left\{ 1 - \varepsilon^{-2\alpha(t-5T)} \left\{ 1 - 8\alpha^2(t-5T)^2 \right\} \right\} \varepsilon^{-k \frac{5\ell}{v}} \cdot H(t-5T)
 \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} (\alpha \div \beta \text{ の場合}) \\ (2.4) \end{array} \right\}$$

この場合、(2.3)式に各常数 $R_u = 8.55 \Omega/m$, $L_u = 0.22 \text{ mH}/m$, $\ell = 33 \text{ m}$, $v = 4.1 \text{ m}/\mu\text{s}$ を用いて計算すると、

$$k = \frac{1}{2} \frac{R}{L_u} = 1.94 \times 10^4$$

$$\varepsilon^{-k \frac{\ell}{v}} = \varepsilon^{-1.94 \times 10^4 \times \frac{33}{4.1 \times 10^6}} = 0.855$$

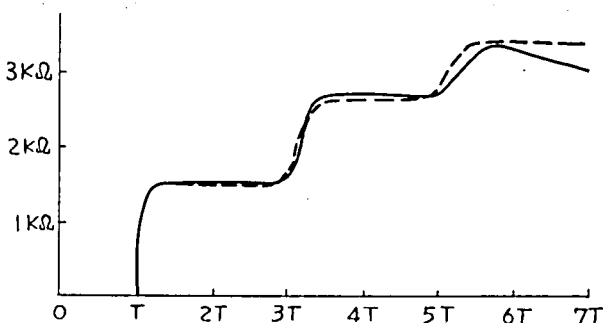
電圧波形を計算すると、結果は第2.13図の点線となり、実測値(実線)とよく一致する。

次に時間至過後の減衰振動波形を考察するため模擬送電線を集中静電容量 C_0 と考え近似解を求める。模擬送電線のサージインピーダンスは

$$Z = \sqrt{\frac{L_u}{C_u}}$$

であり、伝播速度は

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_u C_u}}$$



第2.13図

であるから長さ l の模擬送電線の全静電容量は次のようになる。

$$C_0 = l C_u = \frac{l}{vZ} = \frac{T}{Z}$$

インダクタンス L_t と抵抗 R_t の並列回路に静電容量 C_0 より電流 I が流入して起る振動の方程式は

$$e = \frac{I}{\omega C_0} \varepsilon^{-\frac{1}{2R_t C_0} t} \sin \omega t = \frac{E}{\sqrt{\alpha T}} \varepsilon^{-\alpha t} \sin \frac{\alpha t}{\sqrt{\alpha T}} \quad (2.5)$$

$$\text{ここに } \omega = \frac{1}{\sqrt{L_t C_0}} = \sqrt{\frac{\alpha}{T}} \quad \text{また } E = ZI \quad \alpha = \frac{Z}{L_t} \quad \alpha_1 = \frac{1}{2R_t C_0}$$

この近似式(2.5)に下記の各定数を代入すると、

$$T = 8 \mu s, \quad C_0 = T/Z = 8900 \text{ pF}, \quad R_t = 34.3 \text{ k}\Omega, \quad L_t = 275 \text{ mH},$$

$$Z = 900, \quad \alpha = Z/L_t = 3270, \quad \alpha_1 = \frac{1}{2R_t C_0}$$

$$e = \frac{E}{\sqrt{3270 \times 8 \times 10^{-6}}} \varepsilon^{-1.63 \times 10^3 t} \sin \sqrt{\frac{3270}{8 \times 10^{-6}}} t$$

$$= 5.550 \times 10^3 I \varepsilon^{-1.63 \times 10^3 t} \sin (2.02 \times 10^4 t) \text{ V}$$

この式に従って計算し、インピーダンスに換算して e/I であらわした最大値および周期を、それらの実測値と比較すると第2.1表となる。

第2.1表

	最大値	周期
実測値	3.58 k Ω	250 μ s
計算結果	4.89 k Ω	310 μ s

- (b) 変圧器の接続を1次巻線1端印加他端開放 2次巻線短絡接地とした場合

第2.14図の印加端(A)のインデシヤル・インピーダンスおよびこれに対応する変圧器端(B), 変圧器巻線他端(B0)の電圧波形を第2.15図に示す。

この変圧器結線では、第1章第2節に求めたように変圧器はほとんど静電容量としてき、第2.16図のように見做され、その往復反射の格子図は第2.17図のようになる。

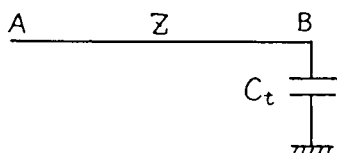
静電容量 C_t の端子での反射係数は次のようになる。

$$a = \frac{\frac{1}{pC_t} - Z}{\frac{1}{pC_t} + Z} = \frac{\frac{1}{C_t Z} - p}{\frac{1}{C_t Z} + p} = \frac{\gamma - p}{\gamma + p}$$

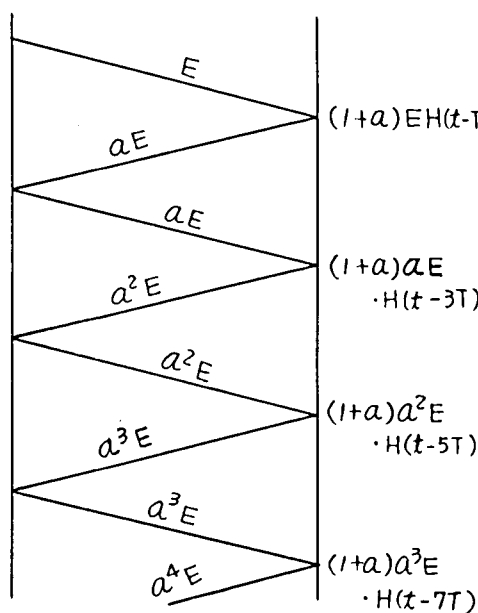
$$\text{ここに } \gamma = \frac{1}{C_t Z}$$

格子図第2.17図より往復反射により静電容量の端子(B)にあらわれる電圧 e は次のようになる。

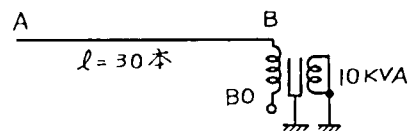
$$\begin{aligned} e &= e_T + e_{3T} + e_{5T} \\ &= (1+a)EH(t-T) + (1+a)aEH(t-3T) \\ &\quad + (1+a)a^2EH(t-5T) + \dots \end{aligned}$$



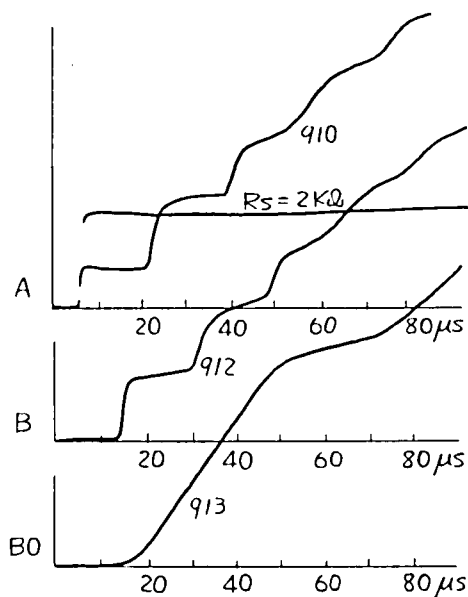
第2.16図



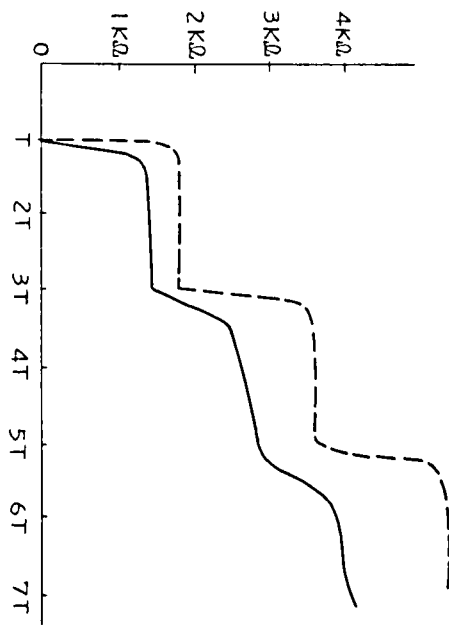
第2.17図



第2.14図



第2.15図



第2.18図

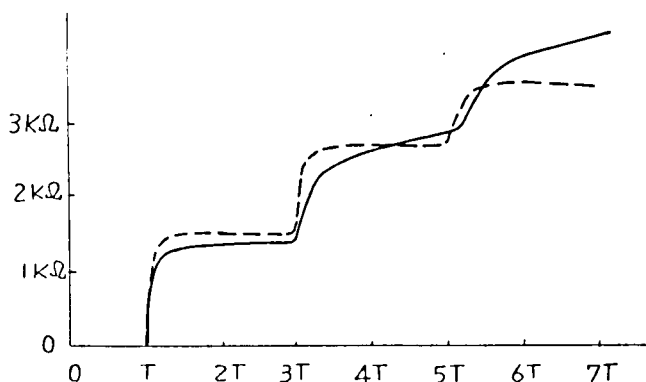
$$\left. \begin{aligned}
 e_T &= (1+\alpha)EH(t-T) \\
 &= 2E\{1-\varepsilon^{-\delta(t-T)}\} \cdot H(t-T) \\
 e_{3T} &= (1+\alpha)\alpha EH(t-3T) \\
 &= 2E\{1-\varepsilon^{-\delta(t-3T)}\{1+2\delta(t-3T)\}\} \cdot H(t-3T) \\
 e_{5T} &= (1+\alpha)\alpha^2 EH(t-5T) \\
 &= 2E\{1-\varepsilon^{-\delta(t-5T)}\{1+2\delta^2(t-5T)^2\}\} \cdot H(t-5T)
 \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

(2.6)式に各定数 $T = 8\mu s$ $Z = 900\Omega$ $C_t = 300\text{PF}$ $\delta = 1/ZC_t = 3.7 \times 10^6$ を使用して計算すると、結果は第2.18図の点線となる。なお印加した電流は矩形波で、また $E = IZ$ であるから図には電圧を電流で除した値、すなわちインピーダンスとしてあらわしてある。

これは前述(a)の場合と同様この場合も計算値は実測値より相当大きい。(2.6)式に模擬送電線を伝播する場合の減衰を考慮に入れると(2.5)式と同様にして

$$\left. \begin{aligned}
 e_T &= 2E(1-\varepsilon^{-\delta(t-T)})\varepsilon^{-k\frac{t}{T}} \cdot H(t-T) \\
 e_{3T} &= 2E\{1-\varepsilon^{-\delta(t-3T)}\{1+2\delta(t-3T)\}\}\varepsilon^{-k\frac{3t}{T}} \cdot H(t-3T) \\
 e_{5T} &= 2E\{1-\varepsilon^{-\delta(t-5T)}\{1+2\delta^2(t-5T)^2\}\}\varepsilon^{-k\frac{5t}{T}} \cdot H(t-5T)
 \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

(2.7)式に前述の各定数を使用して計算すると結果は第2.19図の点線となり実測値(実線)と良く一致する。



第2.19図

(2) 模擬送電線の終端に150 KVA変圧器を接続した場合の過渡特性

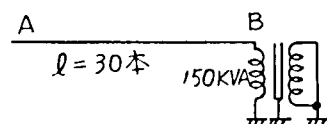
(a) 変圧器の接続を2次巻

線1端印加他端接地 1次巻線短絡接地とした場合

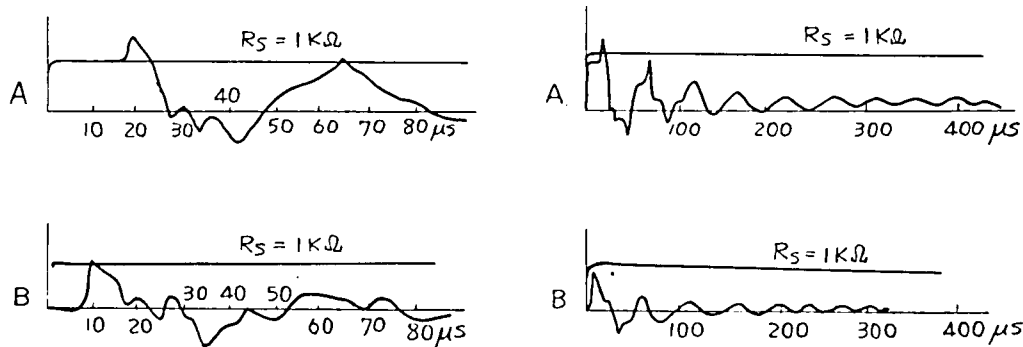
この場合は変圧器巻線の振動周期と模擬送電線上の進行波の往復時間が大体等しい場合であり、この場合の始端(A)のインデューシヤルインピータ

ンス、およびこれに対応する変圧器端
(B) の電圧波形を第 2.21 図に示す。

先ず減衰を考慮していない(2.1)式
に



第 2.20 図



第 2.21 図

各定数 $T = 8\mu s$, $Z = 900\Omega$, $L_t = 3.82\text{ mH}$, $C_t = 954\text{ pF}$, $R_t = 23.4\text{ K}\Omega$ を使用すると

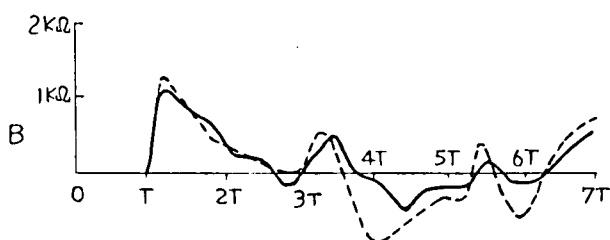
$$\alpha = \frac{R_t + Z}{2C_t R_t Z} = \frac{23.4 \times 10^3 + 900}{2 \times 954 \times 10^{-12} \times 23.4 \times 10^3 \times 900} = 6.04 \times 10^5$$

$$\beta = \sqrt{\alpha^2 - \frac{1}{C_t L_t}} = \sqrt{3.65 \times 10^{11} - 2.74 \times 10^{11}} = 3.02 \times 10^5$$

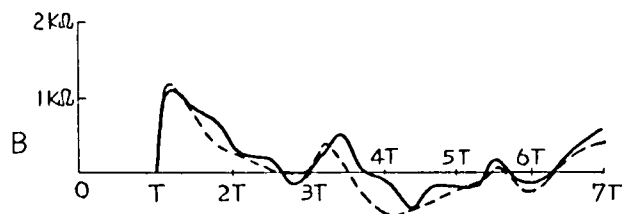
であるから計算結果は第
2.22 図の実線となる。

次に減衰を考慮に入れた(2.3)式に上述の各定数を使用して計算すれば、結果は第 2.23 図の実線となる。

何れも実線で示した実測値とかなり良く合っているが、特に減衰を考慮した場合、第 2.23 図は非常によく合っている。



第 2.22 図



第 2.23 図

時間経過後の減衰振動波形を考察するために前述の近似式(2.5)を用い、定数 $T = 8 \mu s$, $L_t = 3.82 mH$, $Z = 900 \Omega$, $C_0 = 8900 pF$, $R_t = 23.4 K\Omega$ を代入して求めると、

$$\alpha = \frac{Z}{L_t} = \frac{900}{3.82 \times 10^{-3}} = 236\,000 \quad \alpha_1 = \frac{1}{2R_t C_0}$$

(2.5)式は

$$e = \frac{E}{\sqrt{236\,000 \times 8 \times 10^{-6}}} e^{-2.4 \times 10^3 t} \sin \sqrt{\frac{236\,000}{8 \times 10^{-6}}} t \quad V$$

$E = I \cdot Z$ であるから上式を I で割ってインピーダンスに換算すると

$$\frac{e}{I} = 6.65 \times 10^2 e^{-2.4 \times 10^3 t} \sin (1.635 \times 10^5 t) \quad \Omega$$

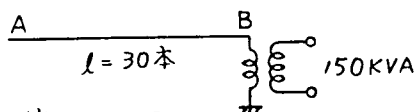
この最大値および周期の計算値を実測値と比較すると第2.2表のようになる。

第2.2表

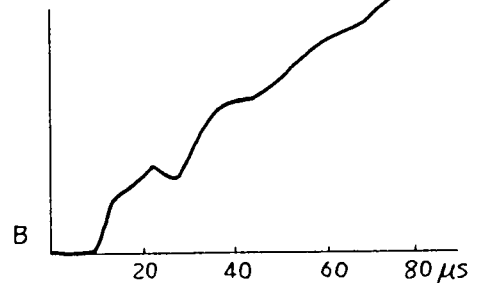
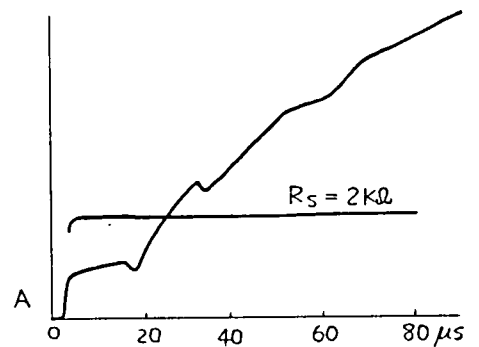
	最大値	周期
実測値	1 K Ω	50 μs
計算結果	0.641 K Ω	36.5 μs

(b) 変圧器の接続を2次巻線1端印加他端接地 1次巻線開放非接地とした場合

インダクタンスが非常に大きくなり変圧器はほとんど静電容量として働く。この場合の印加端(A)のインデューシャルインピーダンスとこれに対応する変圧器端(B)の電圧波形を第2.25図に示す。



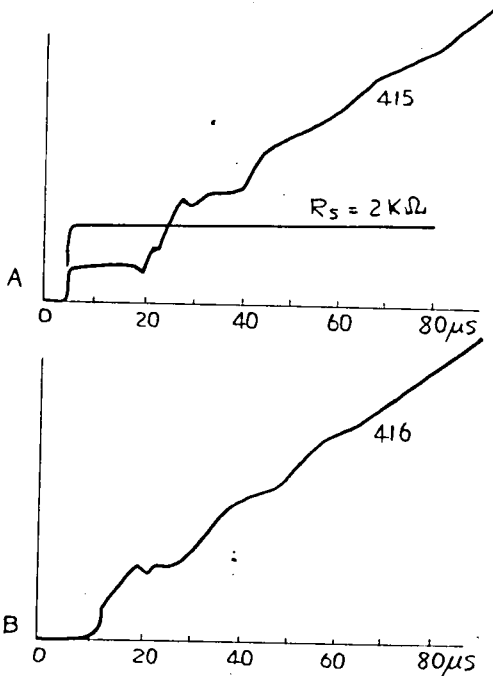
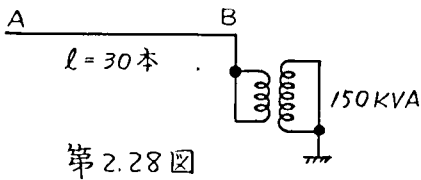
第2.24図



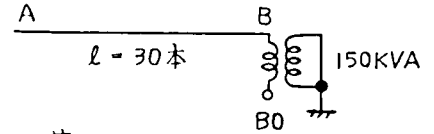
第2.25図

- (C) 変圧器の接続を2次巻線1端
印加他端開放 1次巻線短絡
接地とした場合

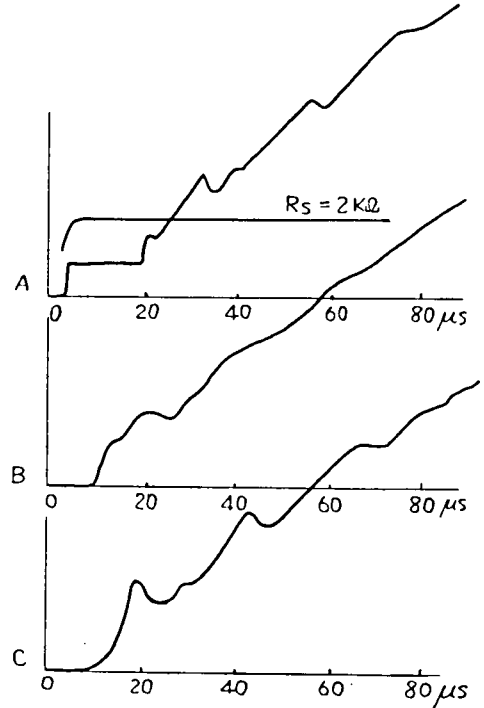
この場合も変圧器は、ほとん
ど静電容量としてきく。印加端
(A) のインデシヤル・インピー
ダンス、およびこれに対応する
変圧器端(B)，変圧器巻線他端
(B0) の電圧波形を第2.27図に
示す。



第2.29図



第2.26図



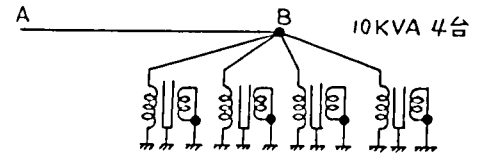
第2.27図

- (d) 変圧器の接続を2次巻線一括印
加, 1次巻線短絡接地とした場合
この場合の印加端(A) のインデ
シヤル・インピーダンス、および
これに対応する変圧器端(B) の電
圧波形を第2.29図に示す。この
場合は変圧器は比較的大きい静電
容量としてきくことがわかる。

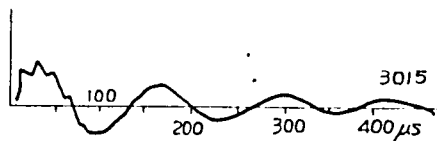
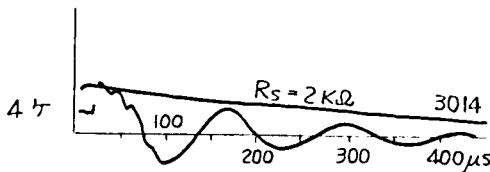
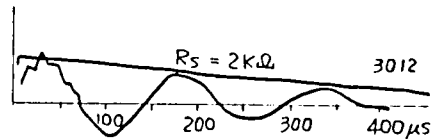
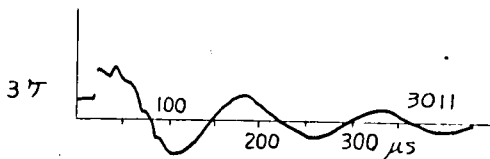
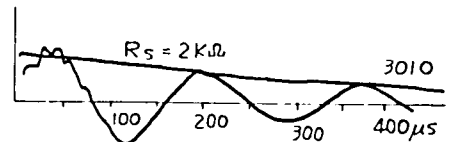
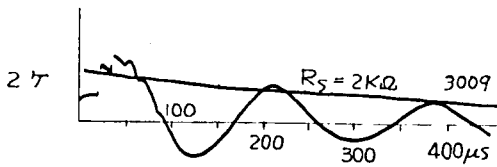
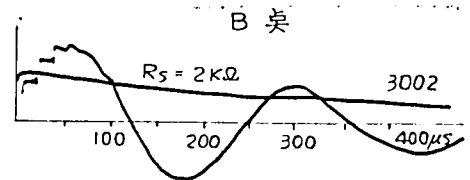
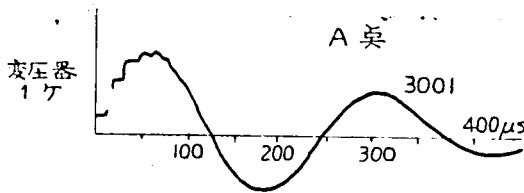
第 4 節 模擬送電線終端に接続する変圧器(10KVA)の数
あるいは模擬送電線の長さを変化した場合の過
渡特性(ただし1次1端印加他端接地、2次短
絡接地の接続とする)

(1) 模擬送電線終端に接続する変圧器の数を
変化した場合の過渡特性

第 2.30 図のように変圧器1ケ、2ケ、
3ケおよび4ケを送電線終端に並列に接
続した場合の印加端(A)のインディシヤ



第 2.30 図



第 2.31 図

ルインピーダンス、およびこれに対する変圧器端(B)の波形を第2.31図に示す。

第3節(1)(a)に述べたように、変圧器はインダクタンス L_t と抵抗 R_t の並列回路としてきくので1ヶ、2ヶ、3ヶおよび4ヶの場合について(2.5)式に従って近似式を求め、それぞれの場合の最大値および周期を計算し、実測値と比較して第2.3表に示す。

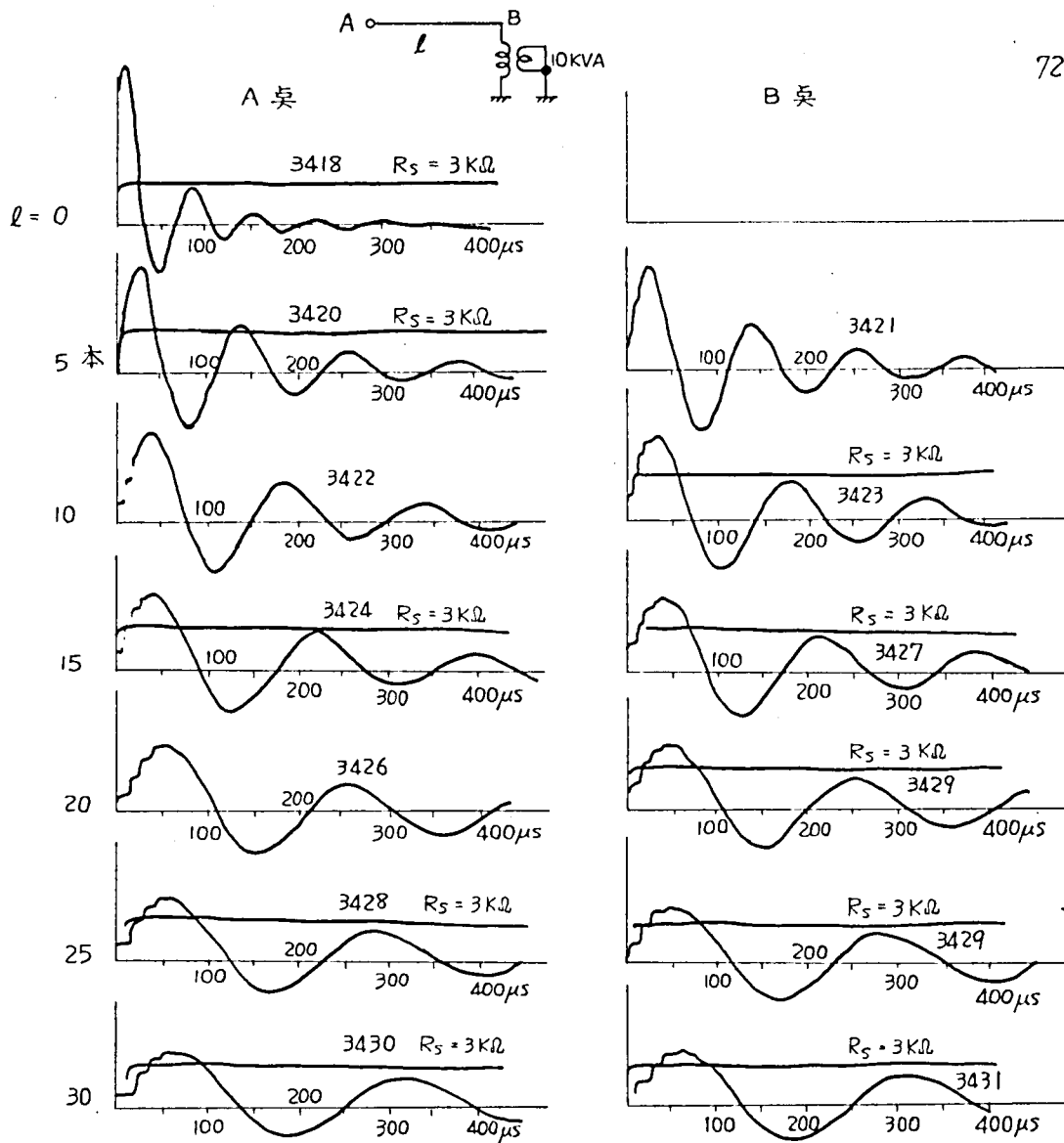
第 2.3 表

変圧器台数		最大値	計算値 実測値	周 期	計算値 実測値
1 台	実測値	3.58K Ω	1.36	250 μ S	1.22
	計算値	4.88"		310"	
2 台	実測値	2.94"	1.04	170"	1.29
	計算値	3.06"		219"	
3 台	実測値	2.44"	0.96	140"	1.28
	計算値	2.20"		179"	
4 台	実測値	1.95"	0.86	130"	1.19
	計算値	1.68"		155"	

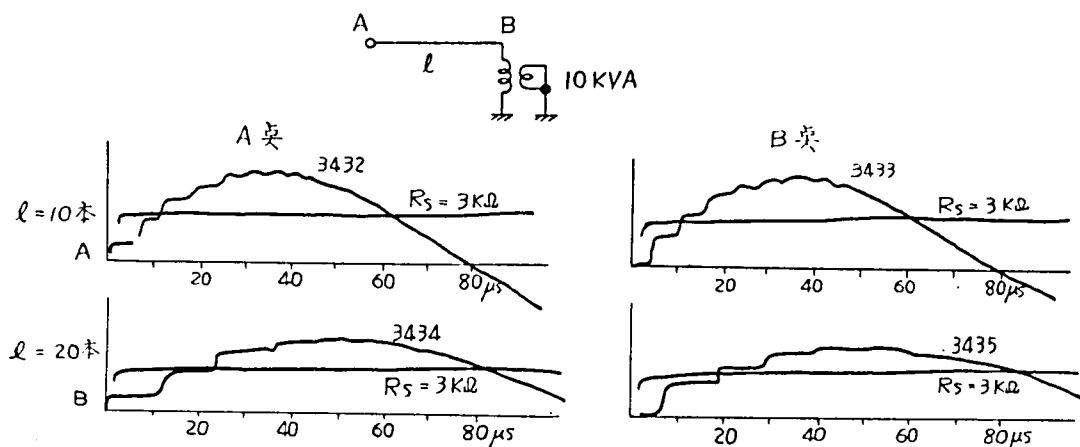
(2) 終端に10KVA単相変圧器を接続した模擬送電線の長さを変えた場合の過渡特性

第2.32図のように模擬送電線の終端に10KVA単相変圧器の1次1端印加他端接地、2次短絡接地したものを接続し、模擬送電線の長さを5本、10本、15本、20本、25本、および30本と変えて、印加端(A)のインディシャルインピーダンスおよびこれに対する変圧器端(B)の波形を第2.32図および第2.33図に示す。(ただし模擬送電線の長さ30本の場合、 $T=8\mu$ S $Z=900\Omega$ $C_0=8900$ PFである)

第3節(1)(a)の場合と同様、変圧器はインダクタンス L_t と抵抗 R_t の並列回路としてきくので送電線の長さを変えた場合のそれぞれについて(2.5)式に従って近似解を求め、最大値および周期を計算し実測値との比較を第2.4表に示す。



第 2.32 图



第 2.33 图

第 2.4 表

模擬送電線長		最大值	計算値 / 実測値	周 期	計算値 / 実測値
5 本	実測値	7.16 kΩ	0.89	110 μs	1.16
	計算値	6.37 "		127 "	
10 本	実測値	5.88 "	1.04	150 "	1.19
	計算値	6.10 "		179 "	
15 本	実測値	4.76 "	1.19	180 "	1.22
	計算値	5.66 "		219 "	
20 本	実測値	4.30 "	1.21	210 "	1.20
	計算値	5.22 "		253 "	
25 本	実測値	3.91 "	1.33	240 "	1.18
	計算値	5.22 "		283 "	
30 本	実測値	3.58 "	1.36	260 "	1.19
	計算値	4.88 "		310 "	

第 5 節 模擬送電線の途中に変圧器を接続した場合の過渡特性

(1) 模擬送電線の中央に変圧器を接続した場合の過渡特性

模擬送電線の中央に変圧器を接続した場合は、印加端(A)、変圧器端(B)、線路端(C)における印加サージの反射が同一位相で重なるため、特異な現象があらわれるのではないかと考えて実験を行なった。

(a) 150KVA 変圧器の 2 次巻線 1 端印加他端接地 1 次巻線短絡接地の場合

線路の両端にサージ・インピーダンスに等しい抵抗 900Ω をつなぎ、無反射としたときの A, B, C 点の波形は、第 2.34 図のようである。

すなわち前述の如く、この場合は変圧器のインダクタンスが小さく、サージ電流はこのインダクタンスを通して放電する。

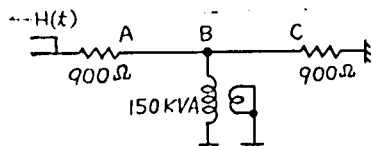
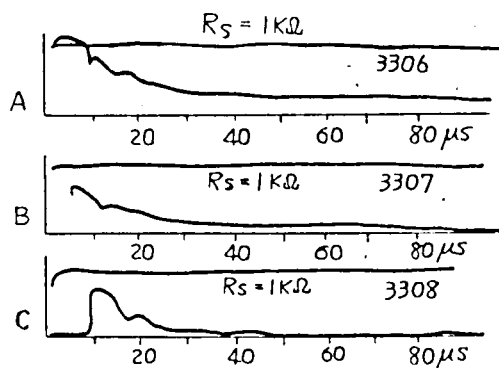
今、変圧器の等価インダクタンスを L_t とすれば、変圧器端(B)の電圧 V_B はこの点より線路を眺めてテブナンの定理を適用することにより次式で求められる。

$$\begin{aligned} V_B &= \frac{Z_L(p)}{\frac{Z}{2} + Z_L(p)} H(t) = \frac{L_t p}{\frac{Z}{2} + L_t p} H(t) \\ &= \varepsilon^{-\frac{Z}{2L_t} t} \cdot H(t) \end{aligned}$$

また B 点での反射係数は次の如くなり

$$a = \frac{Z_L(p)}{\frac{Z}{2} + Z_L(p)} - 1$$

A 点の電圧 V_A は次のようになる。



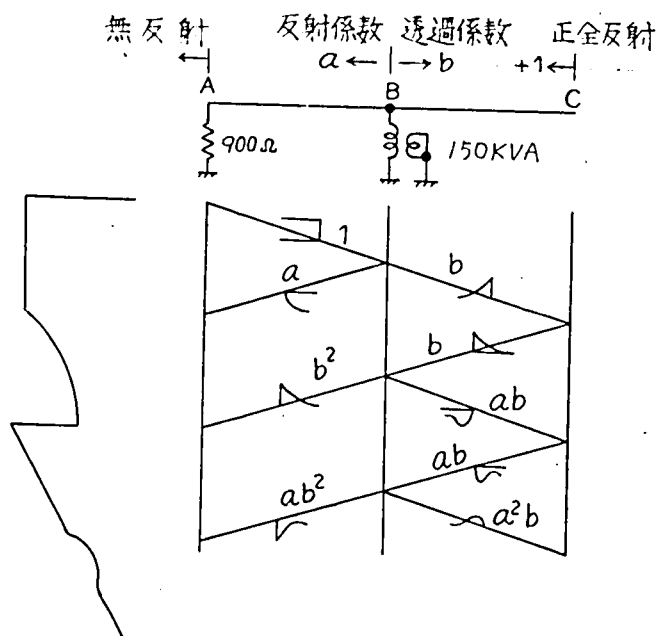
第 2.34 図

$$V_A = (1+a)H(t) = \frac{Z_L(p)}{\frac{Z}{2} + Z_L(p)} H(t)$$

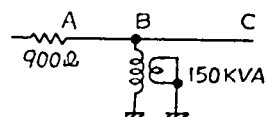
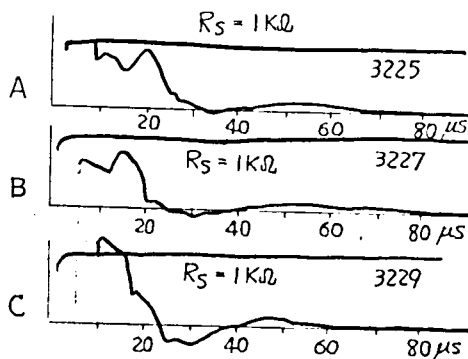
従つて、反射波が到来して後は A, B 両点全く同一の波形となる。これは実験においても明らかである。ただし A 点では時間経過後、零線より電位が上っている。この電位は直流電圧による定常分布であり、模擬送電線の直流抵抗の存在のため印加点で分圧されて残るもので、入力抵抗 900Ω に対する模擬送電線の AB 間抵抗約 140Ω より $\frac{140}{900+140} = \frac{1}{8}$ の電圧が残存していることは図よりも着取される。

次に第 2.35 図のように C 点のみ接続を外して開放したときは C 点で正反射

射が起るため、B, C 間で往復反射が生じ、A 点には全線路の伝播時間に相当する間隔をおいて正および負の反射波が続いて到来する。A 点の波形は第 2.36 図(A)に示すように、第 2.35 図の格子図によるものと一致する。B, C 点の波形は第 2.36 図(B)(C)となり、C 点においては印加波と反射波が重なるため波高は印加波より高くなる。



第 2.35 図



第 2.36 図

次にA点への入力抵抗を高くして、ほとんど完全な正反射させたときの実測例を第2.37図に示す。この場合格子図は第2.38図のように同一極性で反射波が重なるので、A点無反射の場合より峻度が高くなる。またこの場合サージの後の方、すなわち定常状態と考えられるところでは線路は集中静電容量 C_0 と考えられ、変圧器の L_t と自由振動を生ずる。実測による振動の周期および最大波高値は第2.5表のようになった。

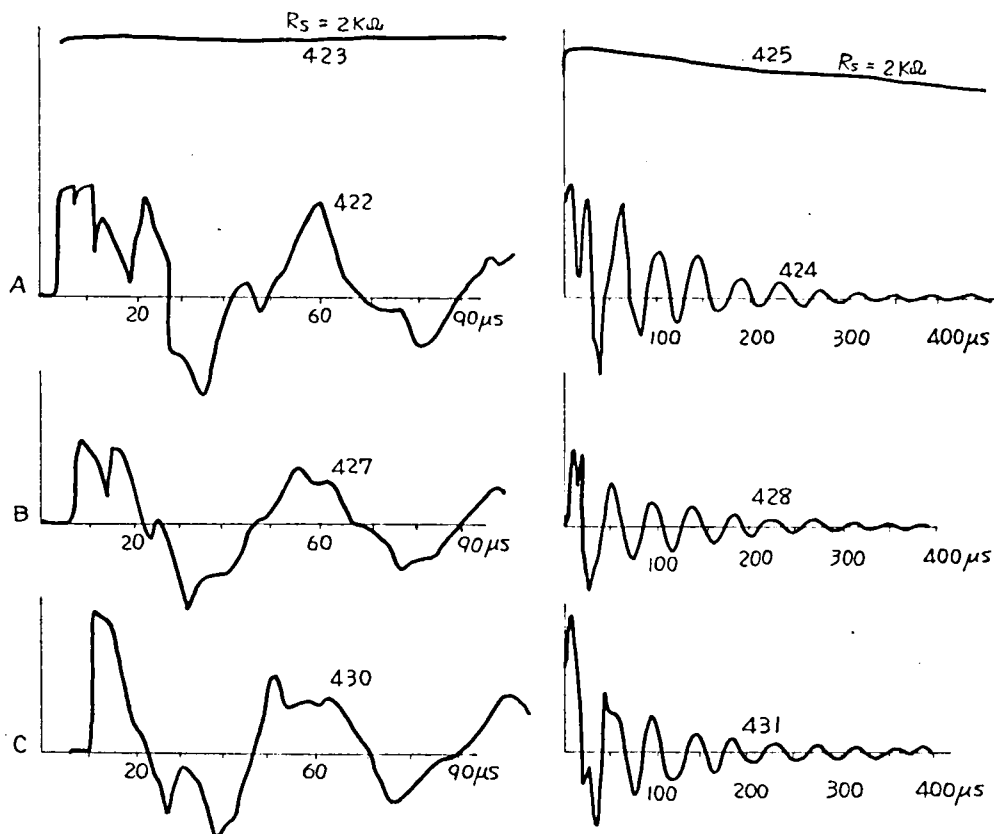
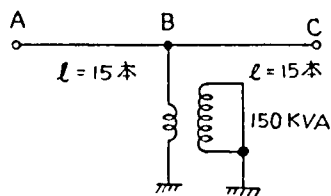
第 2.5 表

	A 点	B 点	C 点
周 期 μs	42	42	42
最大波高値 kV	0.95	0.66	1.13

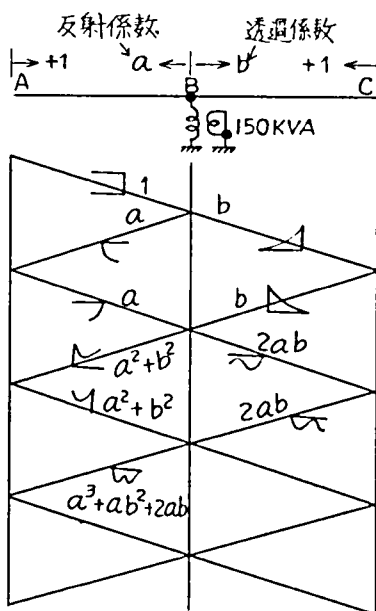
この場合の周期は変圧器を線路終端に接続した第2.2表の場合の0.84倍となっている。

(b) 150KVA変圧器の2次巻線1端印加他端開放1次巻線短絡接地の場合

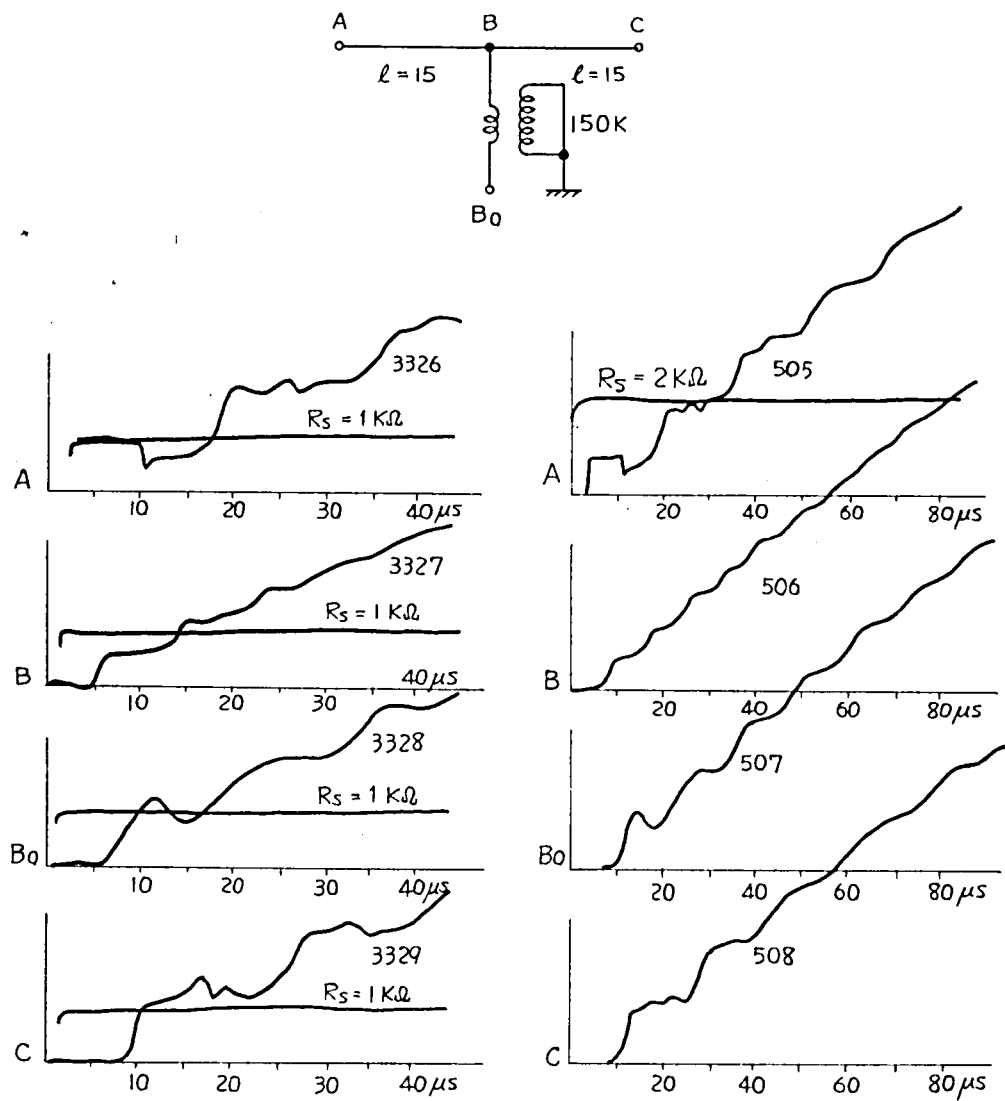
巻線の両端を開放している場合のA点のインデューシヤル・インピーダンスおよびこれに対応するB点、B0点、C点の波形を第2.39図に示す。A点での侵入容量実測値は約6500PFとなる。A点には印加後、8 μs 後にB点の反射があらわれ、16 μs 後にC点の反射がほとんどC点での波形そのままにあらわれている。



第 2.37 圖



第 2.38 圖



第2.39 图

(2) 模擬送電線の途中に変圧器が分布している場合の過渡特性

模擬送電線に10 KVA変圧器4台を種々分布させてインディシャル・インピーダンスを測定したときの各点の電圧波形を観測した結果を第2.40図、第2.41図に示す。変圧器の1端接地時には振動的となる。このインピーダンス・オシログラムよりのA点から見た線路の侵入容量、振動周期、各変圧器接続点の最大振巾を第2.6表に示す。

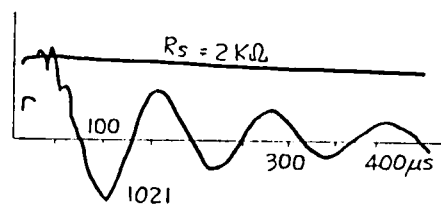
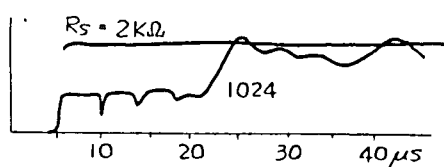
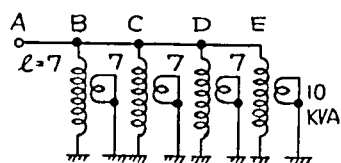
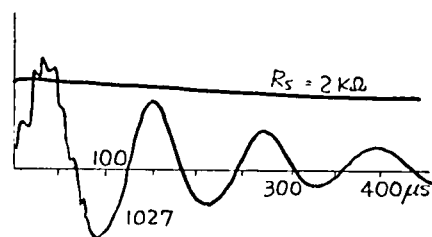
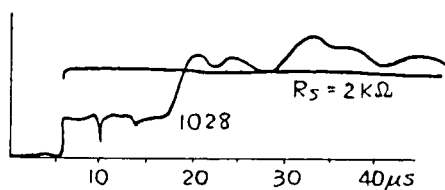
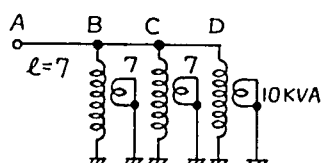
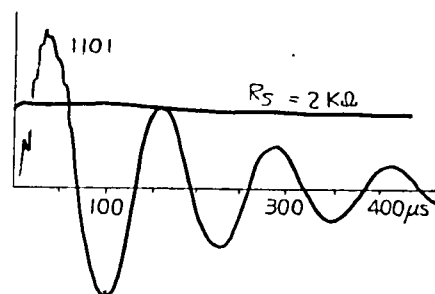
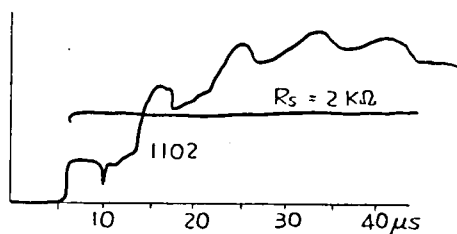
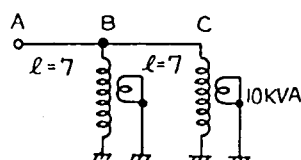
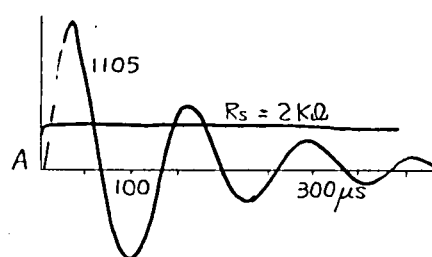
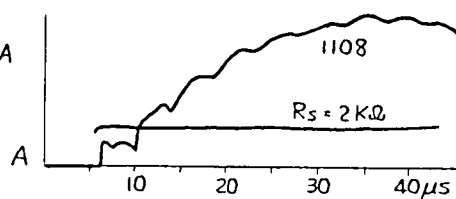
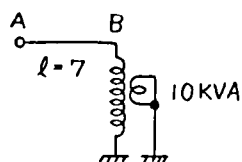
第2.6表

変圧器位置* (本)					侵入容量 C _i (PF)	周 期 (μ s)	最大波高値 (K Ω)				
A	B	C	D	E			A	B	C	D	E
0	7				2500	120	6.3	6.3			
0	7	14			4500	120	3.8		3.4		
0	7	14	21		8000	120	2.5			2.3	
0	7	14	21	28	11000	120	2.2	2.0	2.0	2.0	2.2
0	30				10000	---	4.0	3.5			
0	15	30			11000	---	2.9	2.5	2.5		
0	10	20	30		12500	---	2.5	2.2	2.3	2.4	
0	3	8			4000	95	3.9	3.9	3.9		
0	3	8	15		6000	105	2.6	2.5	2.5	2.7	
0	3	8	15	26	6500	120	2.1	2.0	1.9	1.9	2.0
0	11	18	23	26	6500	120	2.0	1.7	1.6	1.8	1.9

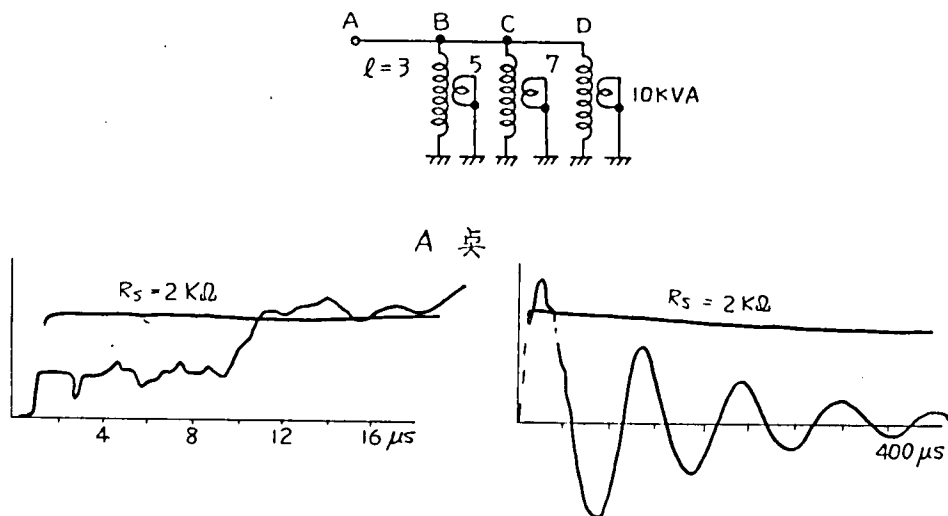
* 模擬送電線の本数を示す。

はじめ模擬送電線7本の終端に変圧器を接続した場合の侵入容量は2500 PF、周期は120 μ sである。これに同一構成の回路を次々につけ加えるとき侵入容量はほぼ構成回路数に比例して増加し、周期は変化しない、一方振動の最大波高値は急速に減少する。

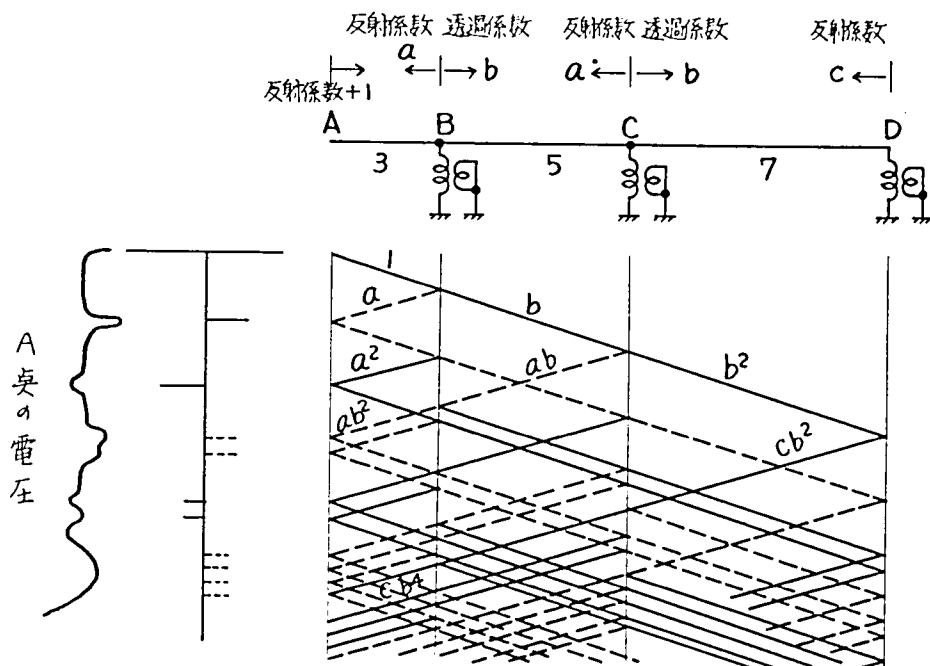
波頭における反射の例として第2.40図では同一間隔を以て規則正しい反



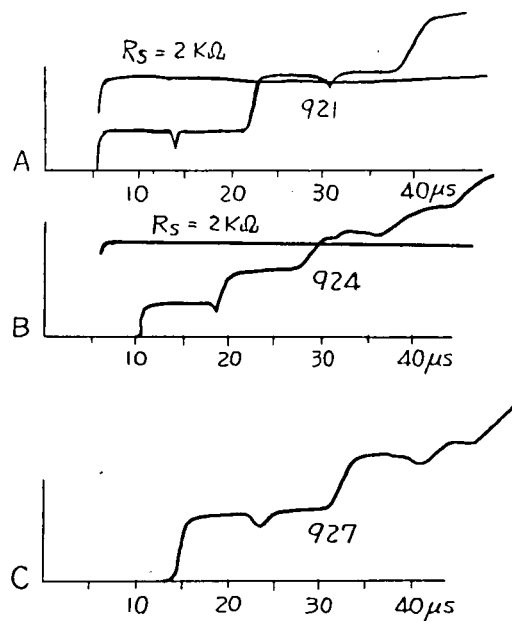
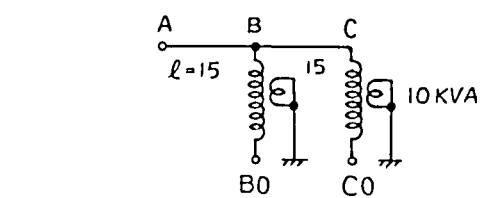
第 2.40 图



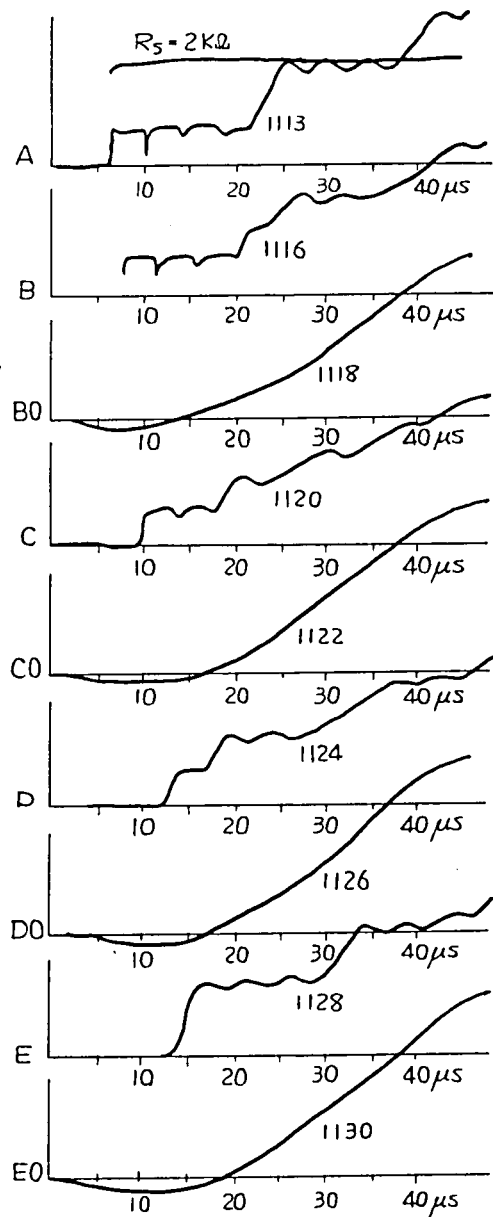
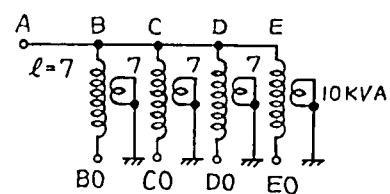
第 2.41 図



第 2.42 図



第 2.43 图



第 2.44 图

射が行なわれている。また第2.41図は変圧器を3, 8, 15の位置に接続した例で、この場合は第2.42図の格子図のように往復反射が行なわれる。はじめの間は明瞭な反射波があらわれるが、後には重なり合って平坦になってしまう。

次に変圧器の1端開放の場合のインディシャル・インピーダンスおよびこれに対応する各部の電圧波形は第2.43図, 第2.44図のようであり、変圧器はほとんど静電容量として働き、電位が一様に上昇する。第2.7表に侵入容量実測値を示す。

第2.7表

変圧器の位置* (本)					侵入容量 (PF)
A	B	C	D	E	
0	30				10000
0	15	30			12000
0	10	20	30		14000
0	7	14	21	28	13500
0	3	8			3000
0	3	8	15		6000

* 模擬送電線の本数を示す。

第 6 節 変圧器の等価回路を接続した模擬送電線の過渡特性

従来線路に変圧器を接続した場合、変圧器は衝撃波の波頭に対しては静電容量として作用するものとして解析されることが多い。しかし先に解析した如く変圧器を静電容量として考へ得るのは衝撃波の印加される巻線の他端が接地されていない場合である。

(1) 変圧器の等価回路を静電容量として模擬送電線に接続した場合の過渡特性

第 2.45 図は静電容量 1000 pF を線路に分布して接続した場合で、印加端のインデイヤル・インピーダンスとこれに対応する線路終端の電圧波形であり、前節の変圧器の他端開放の場合と類似している。これらの場合 A より見た侵入容量は第 2.8 表のようになった。

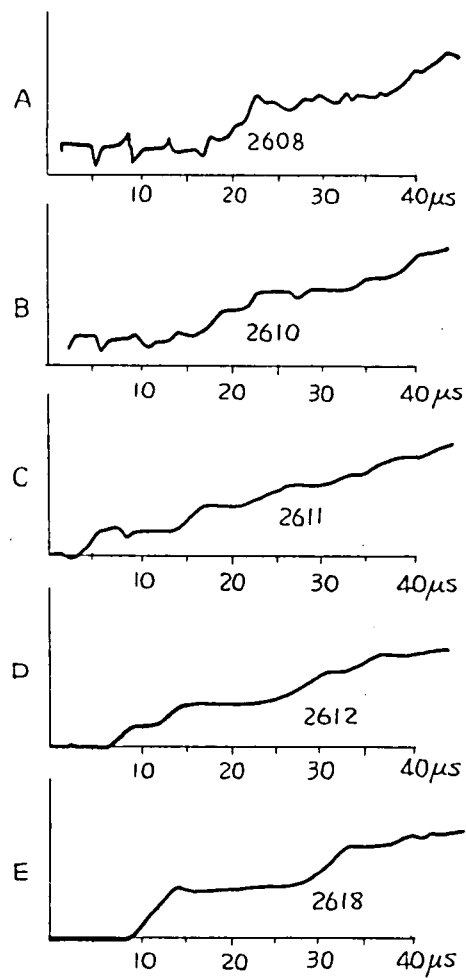
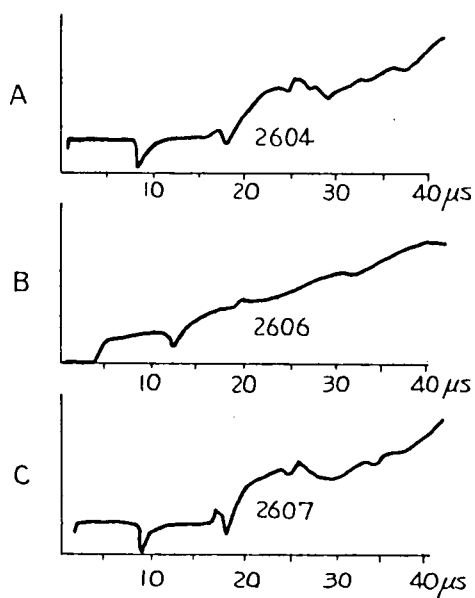
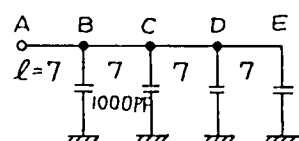
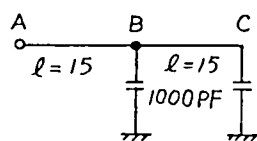
第 2.8 表

静電容量接続位置* (本)					侵入容量 (PF)
A	B	C	D	E	
0	30				10000
0	15	30			10000
0	7	14	21	28	12000
0	3	8	15	26	11000
0	11	18	23	26	12000

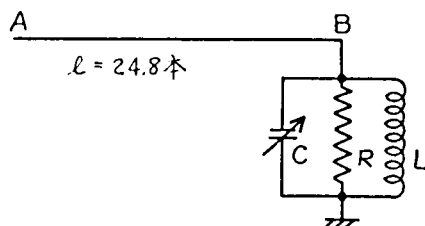
* 模擬送電線の本数を示す。

(2) 変圧器の等価回路を L.R.C の並列回路として模擬送電線に接続した場合の過渡特性

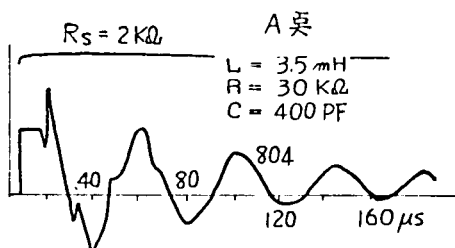
次に巻線が 1 端印加他端接地のときは変圧器を C のみで等価することはできない。第 2.46 図の如く先のインデイヤル・インピーダンスの定数をもった L.R.C の並列回路を変圧器の等価回路とし、模擬送電線に接続する。L = 3.5 mH, R = 30 K Ω とし、C を可変とした。C を変化するとこの回路の共振周波数が変化する。



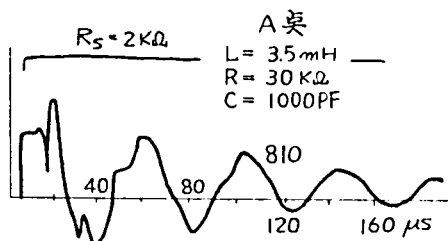
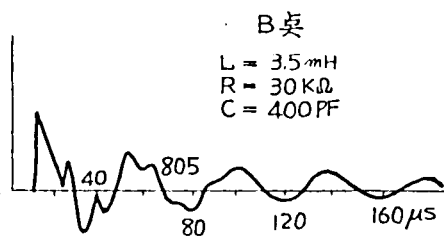
第 2,45 図



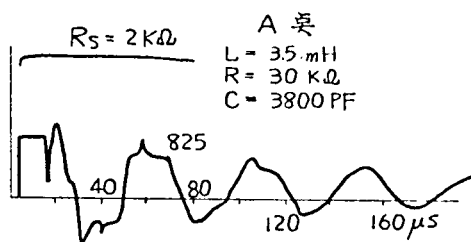
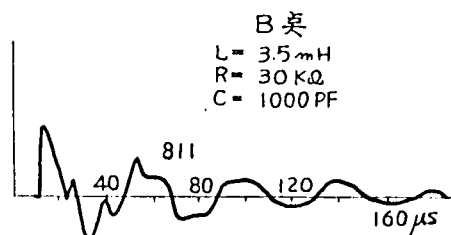
第 2.46 图



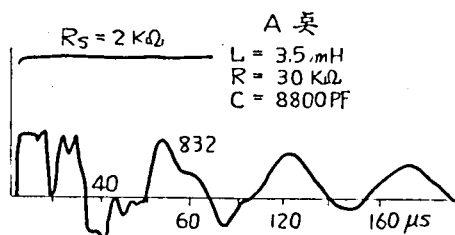
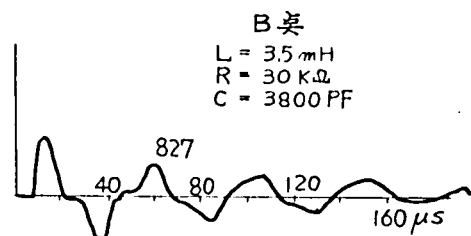
第 2.47 图



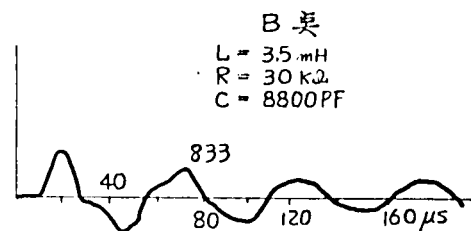
第 2.48 图



第 2.49 图



第 2.50 图



第2.47図の $C = 400 \text{ PF}$ とした場合は、150 KVA変圧器2次巻線1端印加他端接地 1次巻線短絡接地の場合に相当し、第2.21図と良く合っており、第2京大法で求めた等価回路が正しいことを示している。

模擬送電線の長さ24.8本のときの線路往復時間が $12.1 \mu\text{s}$ であった。例えばこの終端に変圧器等価回路をつなぐときは $12.1 \mu\text{s}$ の间隔を置いて、印加端で正反射したサージがこの終端に到来する。供試回路の振動がこの间隔と同期すれば共振して高い電圧になるとも考えられるが、実際には線路は集中静電容量として働き、かかる現象はみられなかった。

変圧器等価回路の C を 1000 PF としたときの周期が $12.1 \mu\text{s}$ となる。この回路を終端に挿入してインデイヤルインピーダンスを測定したときの印加端波形が第2.48図(A)、終端波形が第2.48図(B)である。また倍周波数、3倍周波数の場合を検討するため C を増加し、 $C = 3800 \text{ PF}$ で変圧器等価回路の振動周期が $24.2 \mu\text{s}$ 、 8800 PF で $36.3 \mu\text{s}$ となった。これらの回路を接続した波形を第2.49図、第2.50図に示す。この場合の合成した振動の周期、最大波高値を第2.9表に示す。

第 2.9 表

等価回路の定数			等価回路の固有周期	終端に接続したときの周期	
L	R	C		実測値	計算値
3.5 mH	$30 \text{ K}\Omega$	1000 PF	$12.1 \mu\text{s}$	$40 \mu\text{s}$	$37 \mu\text{s}$
"	"	3800	24.2	48	42
"	"	8800	36.3	53	50

計算値は線路の集中静電容量プラス等価回路の静電容量と変圧器の等価回路のインダクタンスの共振周期であり、振動周期については線路を集中容量と考えてほぼ合致することがわかる。

第 7 節 模擬送電線に変圧器を接続した場合の矩形波電流 印加と標準衝電圧($1 \times 30 \mu s$)印加とによる過渡 特性の比較

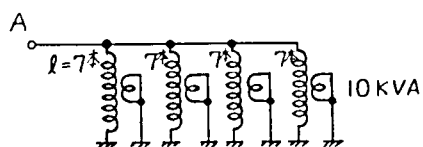
第 2.51 図の如く模擬送電線に等間隔に 10 KVA 変圧器を 4 台 | 次 | 端接地
2 次短絡接地の結線で接続した場合について、矩形波電流または標準衝電圧
($1 \times 30 \mu s$) を印加した場合を比較してみる。

第 2.52 a および b 図には印加端 (A) におけるインデューシャルインピーダンス
波形を示し、第 2.53 a および b 図には同じく印加端 (A) における標準衝電
圧 ($1 \times 30 \mu s$) を印加した場合の波形を示してある。これらの実測波形から
最大値、周期および減衰率を求めた結果が第 2.10 表である。

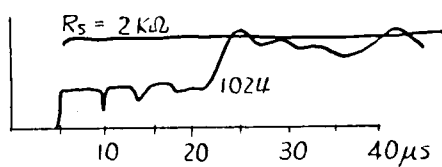
第 2.10 表

	矩形波印加	標準衝電圧 ($1 \times 30 \mu s$) 印加	比率 $\left(\frac{\text{標準衝電圧印加}}{\text{矩形波印加}} \right)$
最大値	2.2 kV	1.8 kV	0.82
周 期	$120 \mu s$	$120 \mu s$	1
減衰率	$4.04 \times 10^3 / s$	$5.31 \times 10^3 / s$	1.32

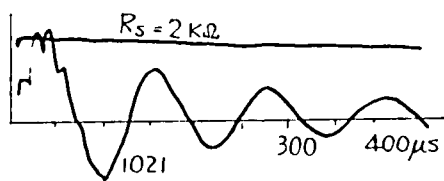
第 2.10 表から矩形波電流を印加した場合に比し、標準衝電圧 ($1 \times 30 \mu s$)
を印加した場合は最大値において 82 % と低く、周期は同一で減衰率は 132
% と大きい。それ故に印加波形によつて周期は不変であるが、最大値および減
衰率は印加電圧波形によつて変り、この場合標準衝電圧の波尾の減衰がきい
てくるため矩形波電流の場合よりも最大値が小さく、減衰率も若干大きい。



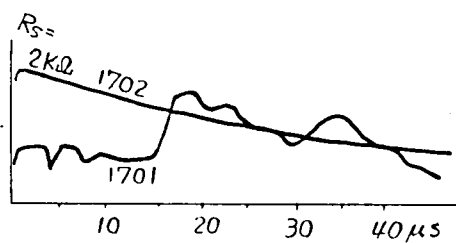
第 2.51 图



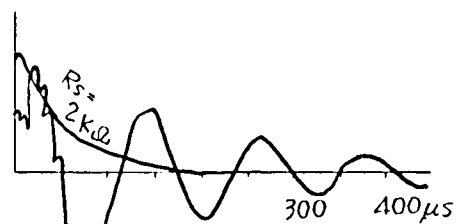
第 2.52 a 图



第 2.52 b 图



第 2.53 a 图



第 2.53 b 图

第 8 節 変圧器を接続した模擬送電線の減衰振動に対する特性

開閉サージ、地絡、あるいは線間短絡等が起ると減衰振動が発生する。この減衰振動によつて、送配電線および変圧器を接続した送配電線にどのような現象が起るか、すなわち共振現象によつて異常な電圧が発生しないか検討するために、次の実験を行った。

第 2.54 図の結線により、前述第 2.2 図の線返し衝撃電圧発生装置の出力端子に反結合抵抗 $3\text{k}\Omega$ を通し、共振回路を励振して線返し減衰振動を発生せしめ、これを高抵抗 $20\text{k}\Omega$ を通して被測定回路に加える。共振回路の静電容量 C を変化して、減衰振動の周波数を変化せしめ、被測定回路の端子 A にあらわれる電圧が極大となる点を求め、そのとき各部の電圧波形、および被測定回路と標準抵抗 $2\text{k}\Omega$ と切りかえたときの抵抗にあらわれる電圧をシンクロスコープ（岩崎通信機製 SS 5101 型）により測定、撮影した。

被測定回路は次のとおりである。

第 2.54 図のように、模擬送電線のみの長さを 10 本、15 本、30 本と変化して接続した場合。

第 2.55 a 図のように、模擬送電線 30 本を接続したものの先端と大地間に 150 KVA 変圧器の 2 次巻線 1 端印加他端接地 1 次巻線短絡接地した場合。

第 2.55 b 図のように、第 2.55 a 図で 150 KVA 変圧器 2 次巻線他端を開放した場合。

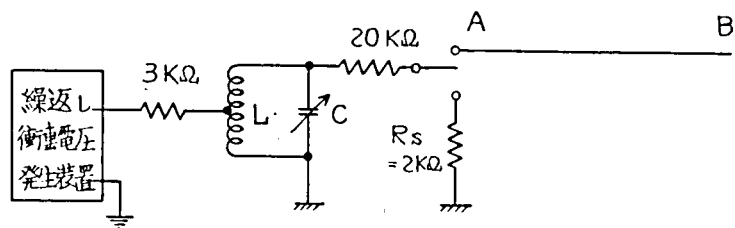
第 2.56 a 図のように、第 2.55 a 図の 150 KVA 変圧器の 2 次巻線を模擬送電線の中央と大地間に接続した場合。

第 2.56 b 図のように、上の場合の 2 次巻線他端を開放した場合。

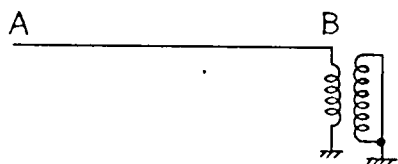
第 2.57 a 図のように、第 2.55 a 図の模擬送電線の中央と、他端にそれぞれ 150 KVA 変圧器 2 次巻線 1 端印加他端接地 1 次巻線短絡接地した場合。

第 2.57 b 図のように、上の場合の 2 次巻線他端を開放した場合。

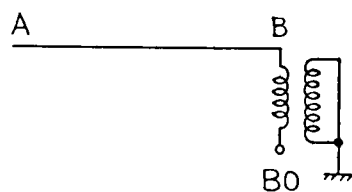
それぞれのオシログラムより、周期 (μs) および最大値 (mm) をまとめると第 2.11 表のようになる。



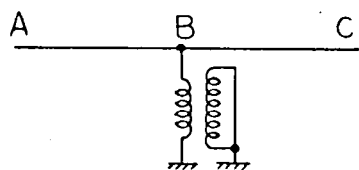
第2.54 図



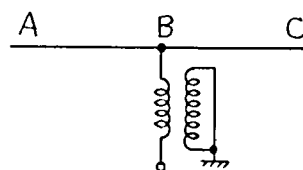
第2.55a 図



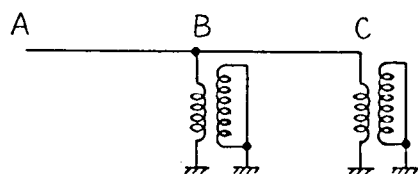
第2.55b 図



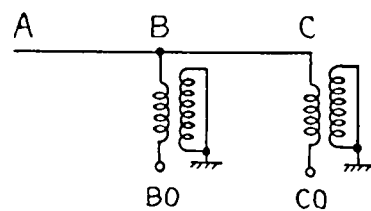
第2.56a 図



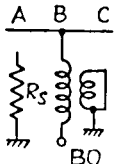
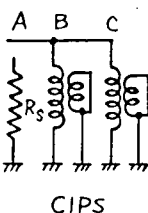
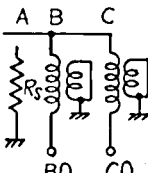
第2.56b 図



第2.57a 図



第2.57b 図

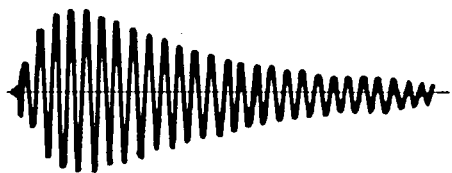
	標準R _s		A ㊦		B ㊦		C ㊦		B0 ㊦			
	周期	最大値	周期	最大値	周期	最大値	周期	最大値	周期	最大値		
	5.5 ^{μs}	19 ^{mm}	5.5 ^{μs}	10 ^{mm}	6.5 ^{μs}	6.0 ^{mm}	5.6 ^{μs}	12 ^{mm}	6.6 ^{μs}	6.5 ^{mm}		
	8.3	14	8.3	8	8.3	8.0	8.3	10	8.7	8.0		
	標準R _s		A ㊦		B ㊦		C ㊦					
	周期	最大値	周期	最大値	周期	最大値	周期	最大値				
	4.5 ^{μs}	22 ^{mm}	4.6 ^{μs}	12 ^{mm}	4.6 ^{μs}	8 ^{mm}	4.6 ^{μs}	11.5 ^{mm}				
	5.8	19	5.6	9.5	5.8	7	5.6	8				
	8.8	14	8.8	9	9.3	9	8.5	7.5				
	9.5	13.5	9.5	9.5	8.6	8	9.5	9				
	*15.6	8	15.6	10	16.0	4	16	9				
	標準R _s		A ㊦		B ㊦		C ㊦		B0 ㊦		C0 ㊦	
	周期	最大値	周期	最大値	周期	最大値	周期	最大値	周期	最大値	周期	最大値
	5 ^{μs}	21 ^{mm}	5.5 ^{μs}	9 ^{mm}	4.7 ^{μs}	7 ^{mm}	5 ^{μs}	8.5 ^{mm}	14 ^{μs}	7 ^{mm}	5.6 ^{μs}	7 ^{mm}
	6	19	5.6	8.5	6	6	6	8.5	6	7	5.6	7.5
	8.2	15	8	7	8.2	6	8.3	7	8	6.5	8.6	9

*印は波形が平滑で高調波を含んでいない。

それ以外のものは分数調波または高調波で共振している様子で平滑な波形でない。R_sは標準抵抗に切り換えたときの電圧波形。

第2.11表中、*印の電圧波形は1例を第2.58図に示すように平滑であり、基本振動をしている場合と考えられ、対数関数の包絡線を持ち、その他の電圧波形は1例を第2.59図に示すように高調波あるいは分数調波分を含んでいない。それぞれの場合標準抵抗にあらわれる電圧は第2.60図および第2.61図のような波形の減衰振動である。

模擬送電線入みの場合は、両端が開放されているときの進行波往復時間が、丁度基本共振周波数の周期となり、他にその分数調波、および高調波の周期で共振する。



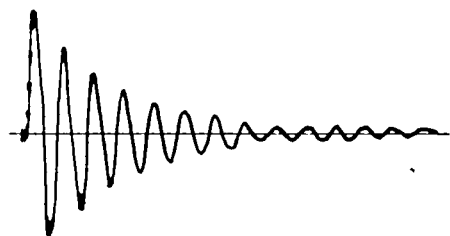
第 2.58 图



第 2.59 图



第 2.60 图

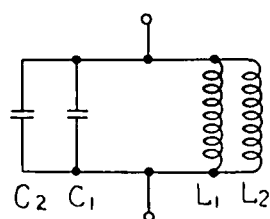


第 2.61 图

模擬送電線の終端に変圧器を接続した場合、その基本共振周波数は模擬送電線と変圧器の基本共振周波数の中間の値となる。何となれば、共振周波数のごく近くの周波数に対しては、模擬送電線を L_1, C_1 の並列共振回路（共振角周波数 ω_1 ）とおきかえる。変圧器の端子から見たインピーダンスも L_2, C_2 の並列共振回路（共振角周波数 ω_2 ）とおきかえ得る。

今、第2.62図のように両者を並列に接続したときの共振周波数 ω に対しては次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\omega^2} &= \frac{1}{\omega_1^2} + \frac{L_1}{L_1 + L_2} \left(\frac{1}{\omega_1} + \frac{1}{\omega_2} \right) \left(\frac{1}{\omega_2} - \frac{1}{\omega_1} \right) \\ &= \frac{1}{\omega_2^2} - \frac{L_2}{L_1 + L_2} \left(\frac{1}{\omega_1} + \frac{1}{\omega_2} \right) \left(\frac{1}{\omega_2} - \frac{1}{\omega_1} \right) \end{aligned} \right\} (2.5)$$



第2.62図

いま $\omega_1 > \omega_2$ と考えると右辺第2項は正および負となり、

$$\therefore \omega_1 > \omega > \omega_2$$

となる。

第2.11表の例では模擬送電線の共振周期は $16.5 \mu\text{s}$ 、変圧器の共振周期は $12.1 \mu\text{s}$ で、両者接続したものはその中間の $15 \mu\text{s}$ となっている。

第2.55b図のように線路終端に他端非接地の変圧器巻線を接続すると第2.11表にみるように、変圧器巻線の開放端にはA端印加電圧の約2倍の電圧があらわれる。

第2.55b図、第2.56b図の変圧器2次巻線の1端のみを送電線の端につなぐ場合、周期はほとんど変わらず、変圧器のCが線路のCに比べて相当小さいことを示している。

第2.56a図、第2.56b図の変圧器を線路の中央につなぐ場合は、線路の振動はほとんど変らない。これは模擬送電線が両端開放であるので、共振周波数の電圧を加えたとき、中央が電圧定在波の節となり、電圧は零であるので変圧器を接続しても、しなくても、また変圧器他端開放であっても、他端接地でも変らないことを示している。

第2.57a図のように模擬送電線の中央と終端に変圧器をつなぐ場合、模擬

送電線の中央は定在波電圧の節となるところで電圧は零であり、ここに接続した変圧器の影響はほとんどなく、送電線の終端のみに変圧器を接続した前述の場合と同じ共振周期をもっている。

第2.57b図のように変圧器の他端開放の場合、中央に接続した変圧器には電圧がかからないので、開放他端の電圧は上昇しないが、模擬送電線の終端に接続した変圧器2次巻線の開放端は、電圧が送電線の終端より約30% 大となっている。すなわち送電線の終端に接続された中性点非接地の星形接続変圧器巻線の中性点は、送電線が共振するような減衰振動電圧が加えられたとき、侵入してきた振動電圧より高い電圧が出ることを解る。

かつ変圧器2次巻線の開放した他端の電圧は、送電線に接続された端子と逆位相の振動をしている。

第 9 節 結 言

以上第2章では、送配電線に変圧器を接続したときの過渡特性を知るために、模擬送電線に単相 10 KVA 6KV/210 V 配電用変圧器および単相 150 KVA 6KV/3KV 絶縁変圧器を接続して、第2京大法によりインデイヤル・インピーダンスおよびこれに対応する各部の電圧、すなわち伝達インピーダンスを測定し、その進行波現象を検計して次の結果を得た。このうち(1)(2)(3)(5)項は特に注目すべき成果である。

- (1) 送電線の線間に変圧器を接続するとき、変圧器は第2京大法で求めたインデイヤル・インピーダンスをもつ C_t , L_t , R_t の並列回路と考えて、線路中の往復反射現象の計算式を導いた。その計算式に各定数を入れた結果は実測値と非常に良く合った。
- (2) また(1)と同様送電線の終端で線間に変圧器を接続するとき、時間全過後の減衰振動については、送電線的全静電容量 C_0 を集中定数と考え、これと変圧器の等価並列インダクタンス L_t および等価並列抵抗 R_t の共振回路によつてその振動周波数および波高値を求める近似式を導き、実測値と良く一致することを示した。
- (3) また(1)項でのべた送電線の線間に変圧器を接続するとき、変圧器は第2京大法で求めた C_t , L_t , R_t の並列回路と考えてよいことの例証として、これらと等しい値をもつ C , L , R の各素子によつて並列回路を作り、この等価回路あるいは変圧器を送電線に接続したとき両者の過渡特性が全く同一であることを実証した。
- (4) 送電線の線間に変圧器が接続されているとき、標準衝垂電圧 ($1 \times 30 \mu s$) を加えたときと矩形波電流を加えたときの各部にあらわれる電圧は、これらの場合変圧器と送電線が減衰振動を行い波尾の方で若干異なるだけで大きな違いはなかった。
- (5) 送電線に変圧器が接続されている場合、減衰振動が入つてきたときの共振現象を知るために、加える減衰振動電圧の振動周波数を変更して共振現象を観測し

たが、変圧器が線間に接続されている場合は異常に大きい電圧は出ないが、変圧器が線路終端にあり、かつ変圧器の巻線の終端が開放されている場合は、印加電圧の2倍程度の電圧があらわれる。従つて中性点非接地の星形巻線では、中性点の電圧が異常に上るおそれがある。

(6) 送電線に変圧器が接続されたときの全体としての共振周波数は、送電線の共振周波数と変圧器の共振周波数の中間となる。

(7) 線路に減衰振動電圧を加えたとき、線路の基本共振周波数で共振したときは平滑な対数関数の包絡線をもつ振動となり、線路の高調波共振周波数で共振したときは平滑な包絡線をもつた振動とはならない。

(8) 変圧器巻線の1端印加他端開放および両端一括印加の場合の如く衝突電圧に対して帰路のない場合、あるいは他巻線開放の如くその巻線のインダクタンスが非常に大きい場合、変圧器の過渡インピーダンスは単なる静電容量となる。

第 3 章 送配電線の進行波特性

第 1 節 緒 言

異常電圧現象すなわち雷害、開閉サージ等は進行波となつて、送配電線上を伝播し、回路条件によつては異常な電圧が発生することもある。従つて送配電線上における進行波の動作行動、すなわち送配電線の進行波特性を知ることが大切である。そのために送配電線自体の進行波の伝播速度、減衰、変歪等、あるいは送配電線上にある分岐、変圧器等による進行波の反射、吸収等を知る必要がある。

これらの問題に關する足がかりを得るために、送配電線の送電端におけるインデイシャル・インピーダンスを第2京大法により実測し、そのインピーダンス・オシログラムより進行波をそれぞれの導体相互間を帰路とする第1種進行波と、それぞれの導体上で同一大きさである(すなわち大地を帰路とする)第2種進行波の2者に分けて考察するようにし、第1種進行波および第2種進行波それぞれの伝播、減衰、変歪を別々に考慮した後、合成することによつて、送配電線の進行波特性を明らかにできることを実証した。

次の各実例につき送電端より、インデイシャル・インピーダンスを実測した。

- a) 30 KV 木柱送電線(短い分岐あり、受電端および分岐の終端は開放状態、長さ 17.6 Km)
- b) 単純な配電線(終端開放 長さ 2.41 Km)
- c) 単純な配電線(終端接地 長さ 2.35 Km)
- d) 単純な配電線(途中に変圧器1個のみある場合 長さ 3 Km)
- e) 複雑なる分岐を有し途中に柱上変圧器を分布している配電線
(長さ $\frac{5.5}{3.4}$ Km)
- f) 複雑なる分岐をもち途中で3相より単相線路に變つてゐる配電線
(長さ 15 Km)
- g) 分岐ある配電線を2回路並列接続したもの (長さ $\frac{34}{30}$ Km 並列)
- h) 変電所より出て変電所にもどる環状配電線 (長さ 10.3 Km)

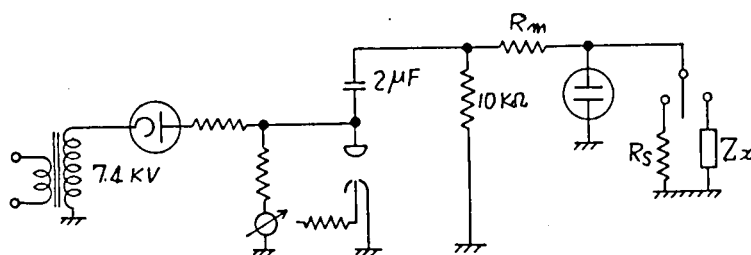
配電線の送電端に短波尾長の衝電波を加え、配電線の途中で波高電圧計およびクリドノグラフで到来する衝電波の波高値を記録し、また逆に配電線の途中より衝電波を印加し、変電所の配電線出口において到来する衝電波を高速度ブラウン管により記録して配電線上の減衰、変歪を実測した。

以上により送配電線上の進行波の伝播、減衰、変歪、反射等の現象の一端を知ることができた。

第2節 第2京大法による送配電線のインデイシャル・インピーダンスの測定オシログラム

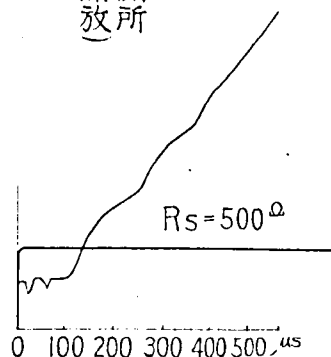
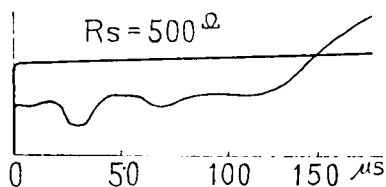
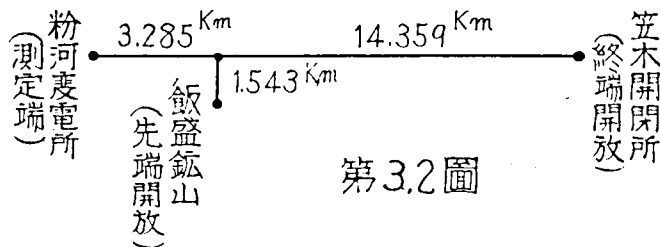
測定に使用した回路は第3.1図のように $2\mu\text{F}$ のコンデンサーと $10\text{K}\Omega$ の抵抗および放電間隙の回路で矩形衝激波を発生し、これを高抵抗 R_m を通じて標準抵抗 R_s および未知インピーダンス Z_x に切り換えて加え、それぞれ R_s , Z_x にあられる電圧を高速変ブラウン管により同一フィルム上に重ねて撮影する。この場合 R_s は Z_x と同一程度のアラウン管の偏向を与える値のものをえらび、 R_m は R_s または Z_x に比べていちじうしく大にしておくと、 $R_m + R_s$ あるいは $R_m + Z_x$ に流れる電流は R_m によつて定る。すなわち R_s あるいは Z_x に流れる電流は R_m によつて定る一定の矩形波電流となる。従つて Z_x および R_s にあられる電圧を比較することにより Z_x のインデイシャル・インピーダンスを求めることができる。

この測定結果のオシログラムおよびその測定時の送配電線の線路図を第3.2 ～ 3.25 図に示す。

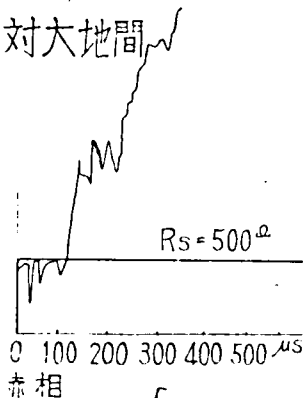
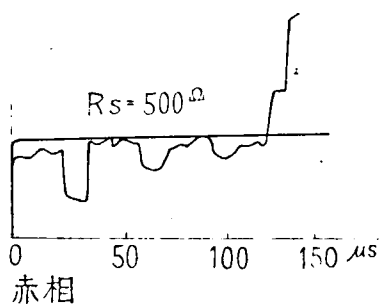


第3.1図 第2京大法接続図

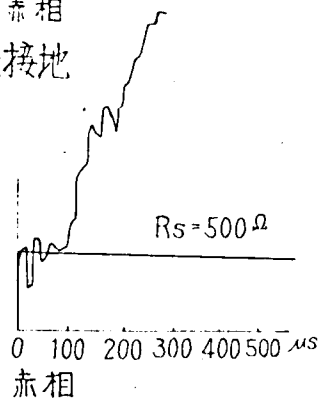
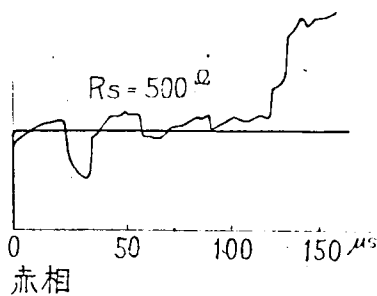
インピーダンス・オシログラム



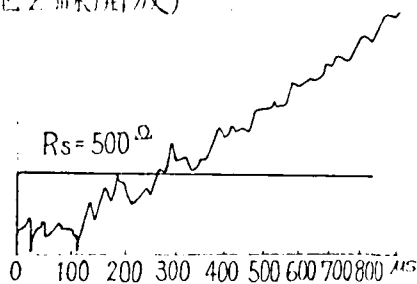
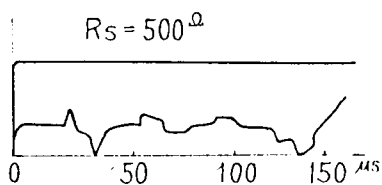
第3.3a圖 3線一括対大地間



第3.3b圖 1線対他2線接地



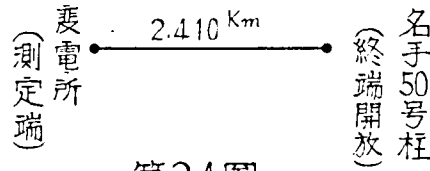
第3.3c圖 1線対大地 (他2線開放)



第3.3d圖 赤相に電壓印加した際白相に現われる電壓(緑相開放)

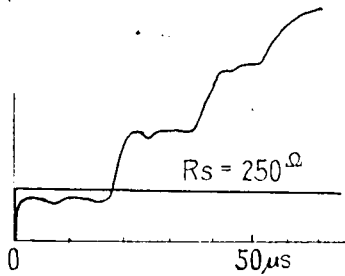
3KV 笠田動力線名手50号柱にて終端開放せる場合の インピーダンス・オシログラム

103

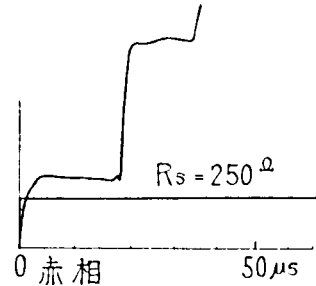


この間に分岐および変圧器負荷無し

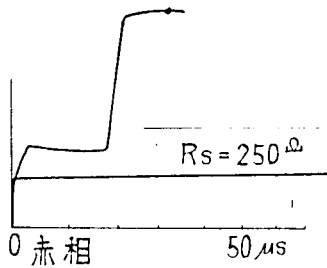
第34圖



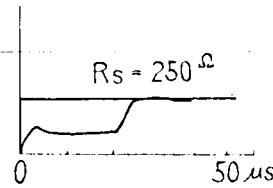
第3.5a圖 3線一括対大地



第3.5b圖 1線対他2線接地



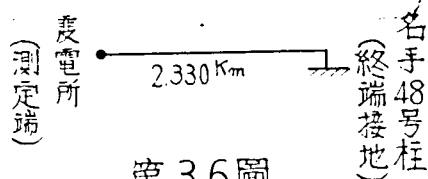
第3.5c圖 1線対大地
(他2線開放)



第3.5d圖 赤相に電壓印加した際
緑相に現われる電壓
(白相開放)

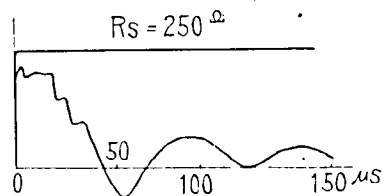
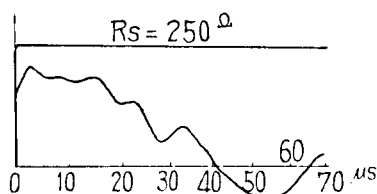
3KV 笠田動力線名手48号柱にて終端接地せる場合の インピーダンス・オシログラム

104

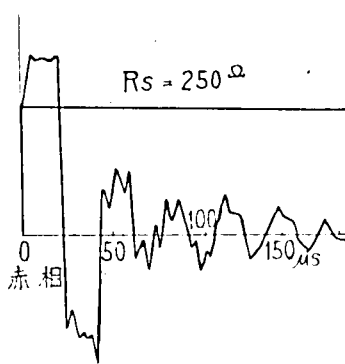
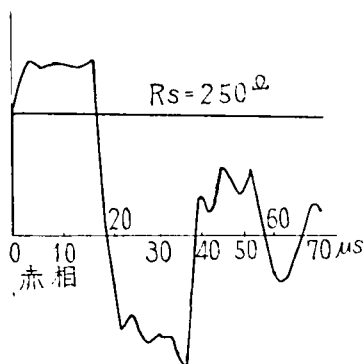


この間に分岐および変圧器負荷無し

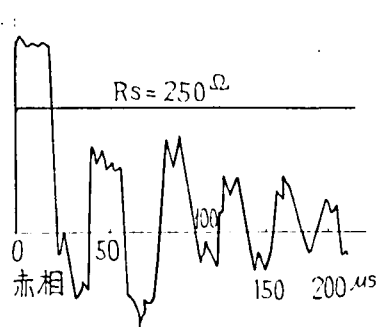
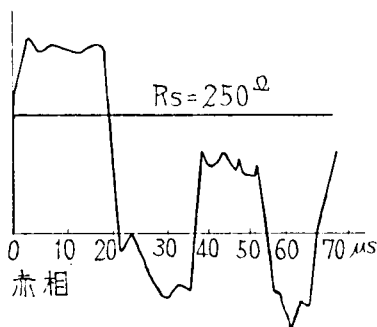
第3.6圖



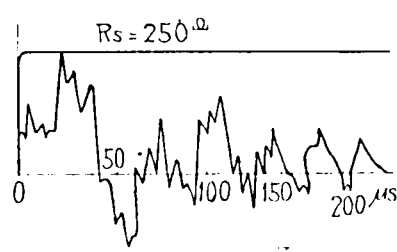
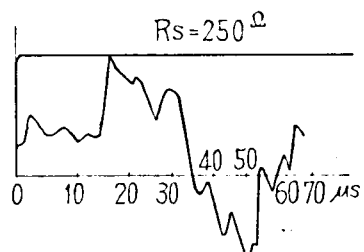
第3.7a圖 3線一括対大地間



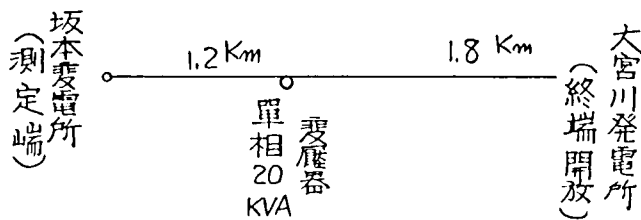
第3.7b圖 1線対他2線接地間



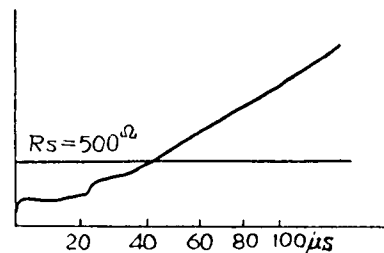
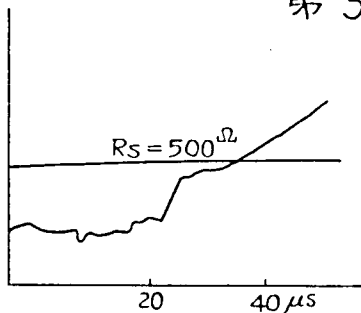
第3.7c圖 1線対大地間(他2線開放)



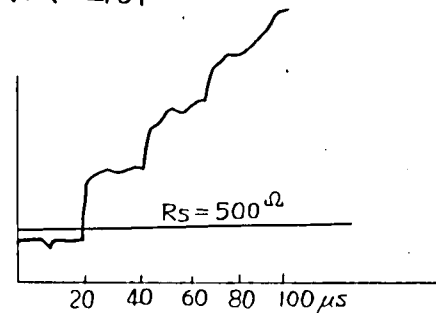
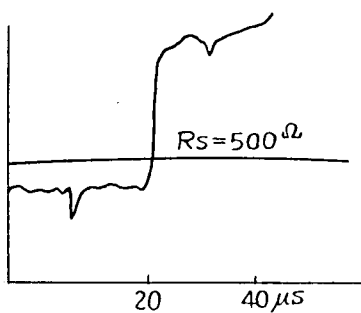
第3.7d圖 赤相に電壓印加した際白相に現われる電壓(緑相開放)



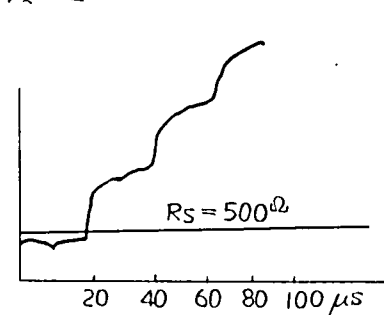
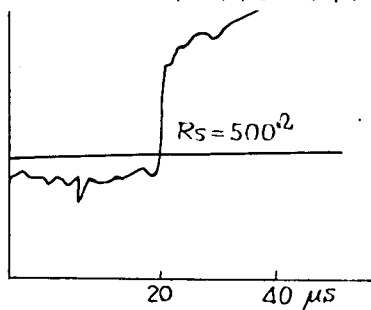
第 3.8 圖



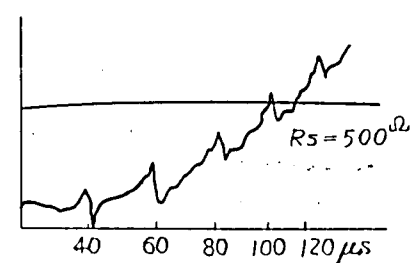
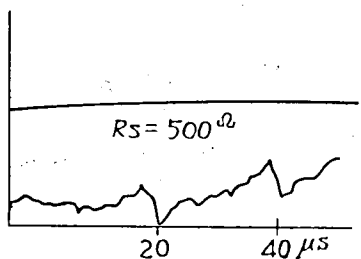
第 3.9a 圖 3線一括対大地間



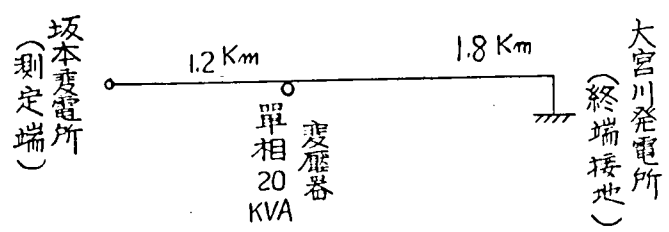
第 3.9b 圖 1線対他2線接地



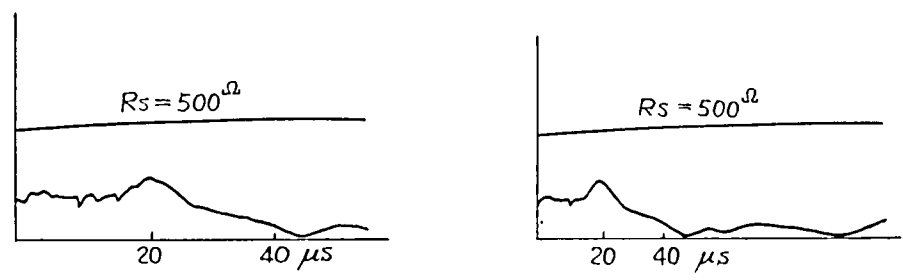
第 3.9c 圖 1線対大地間(他2線開放)



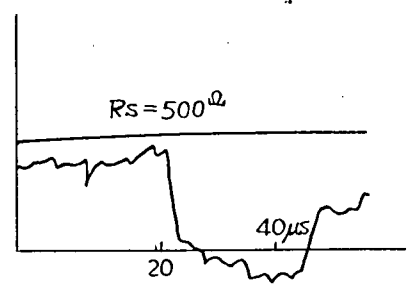
第 3.9d 圖 1線に電壓印加した際他線に現われる電壓



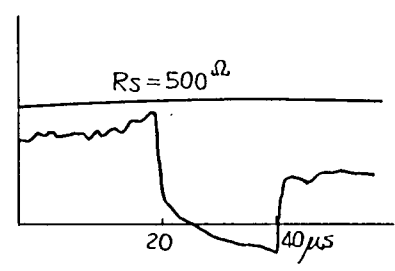
第 3.10 圖



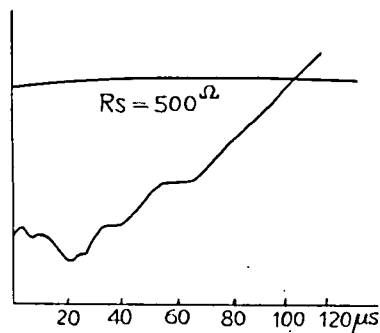
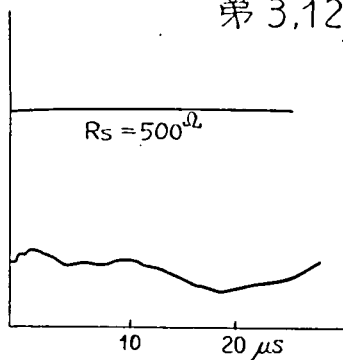
第 3.11a 圖 3 線一括対大地間



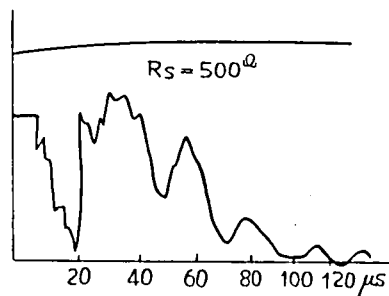
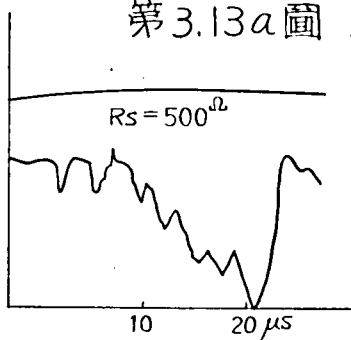
第 3.11b 圖 1 線対他 2 線接地間



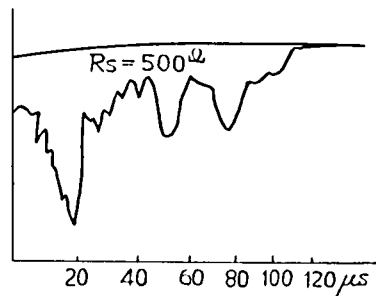
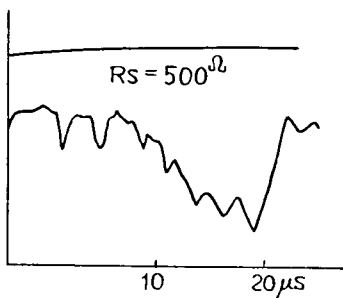
第 3.11c 圖 1 線対他 2 線接地間



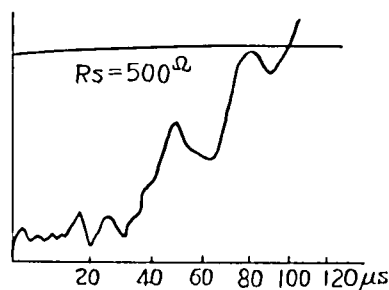
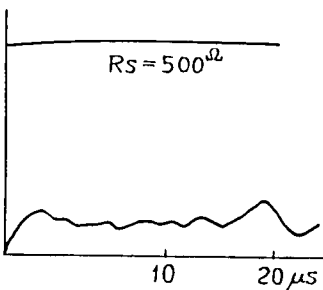
第 3.13a 圖 3線一括対大地間



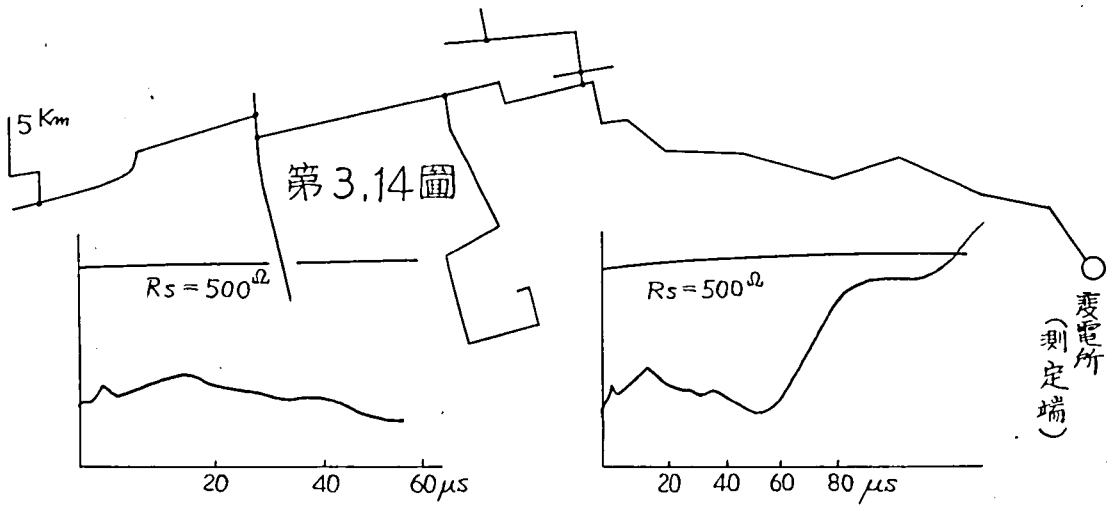
第 3.13b 圖 1線対他2線接地間



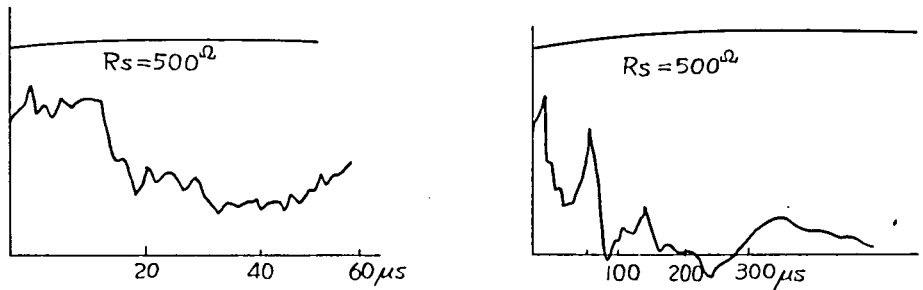
第 3.13c 圖 1線対大地間(他2線開放)



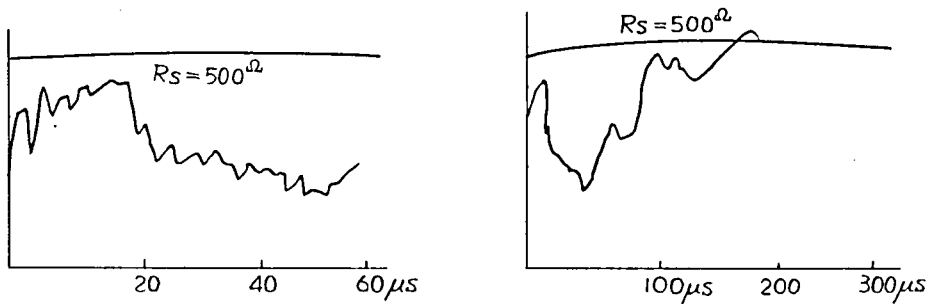
第 3.13d 圖 1線に電圧印加した際他線に現われる電圧(他1線開放)



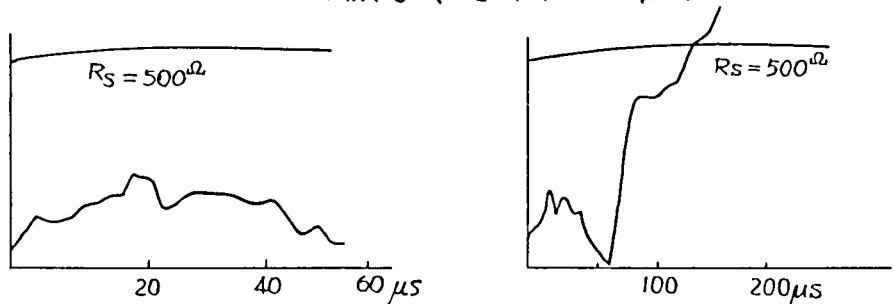
第3.15a圖 3線一括対大地間



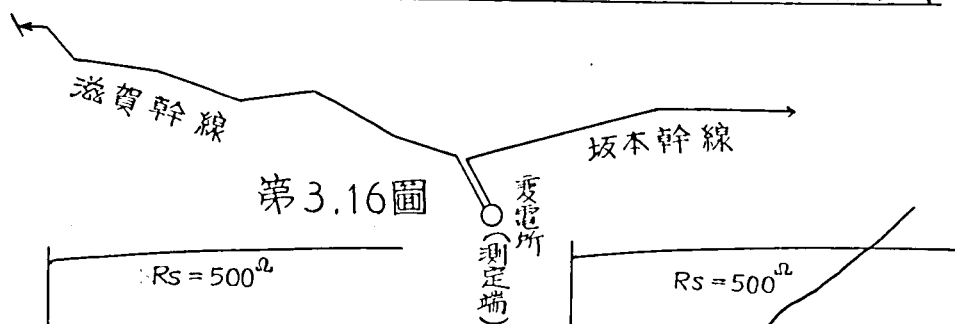
第3.15b圖 1線対他2線接地



第3.15c圖 1線対大地間 (他2線開放)

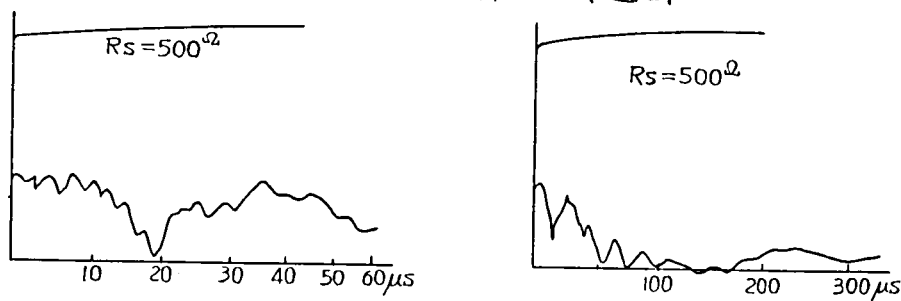


第3.15d圖 赤相に電壓印加した際他線に現れる電壓 (緑相開放)

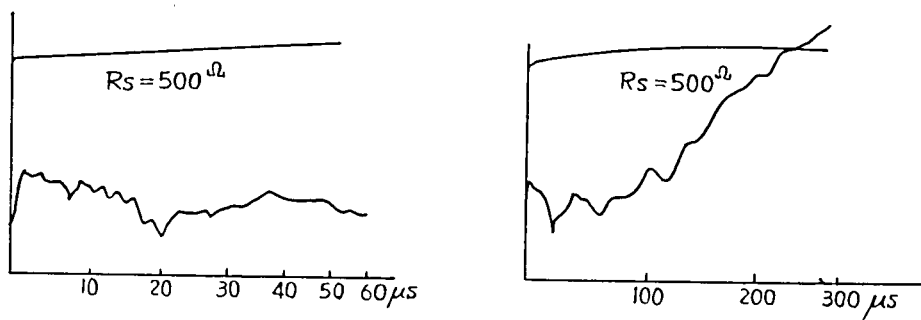


第3.16圖

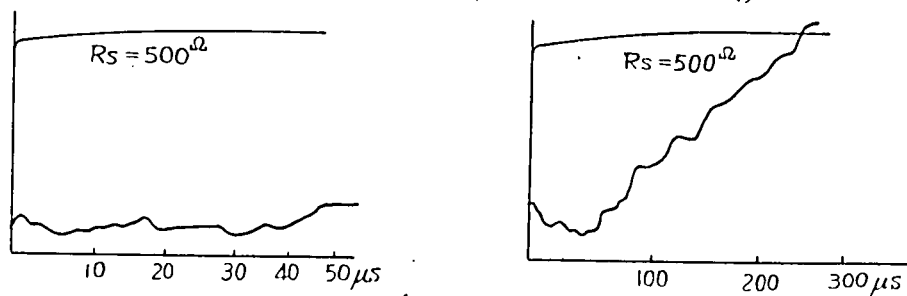
第3.17a圖 3線一括対大地間



第3.17b圖 1線対他2線接地間



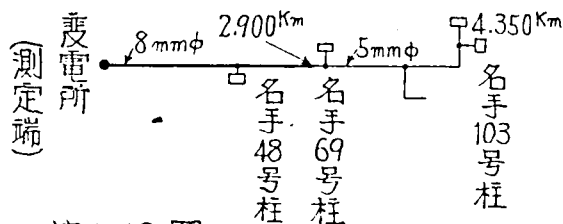
第3.17c圖 1線対大地間(他2線開放)



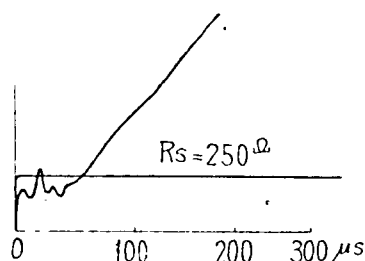
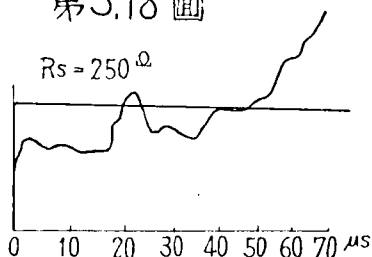
第3.17d圖 赤相に電壓印加した際白相に現われる電壓

3KV 笠田動力線四郷分岐直前迄の幹線にて終端開放の場合の インピーダンス・オシログラム

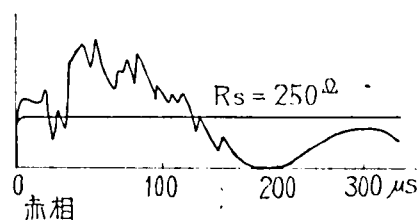
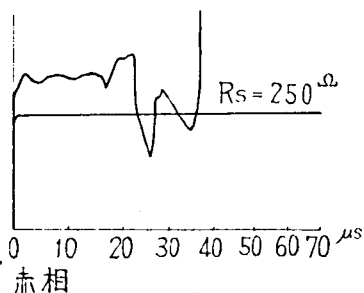
110



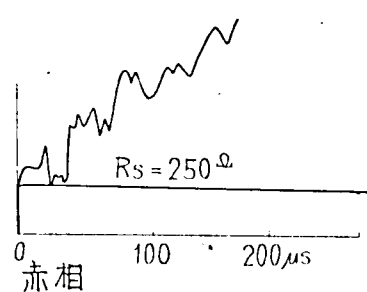
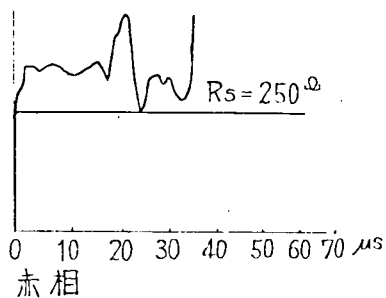
第3.18 圖



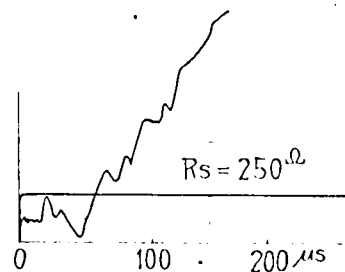
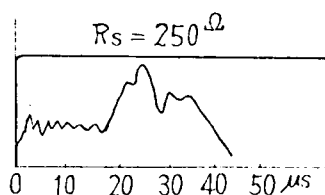
第3.19a 圖 3線一括対大地間



第3.19b 圖 1線対他2線接地間

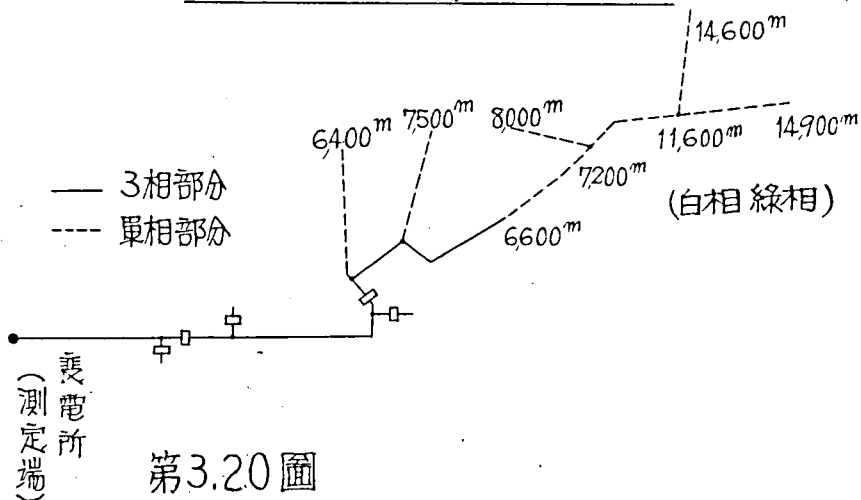


第3.19c 圖 1線対大地間(他2線開放)

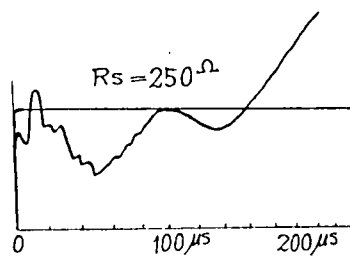
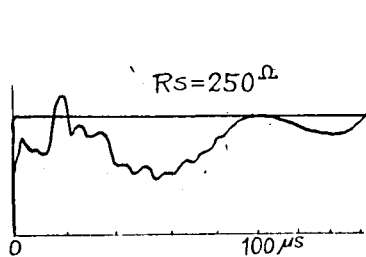


第3.19d 圖 赤相に電壓印加した際白相に現われる電圧(緑相開放)

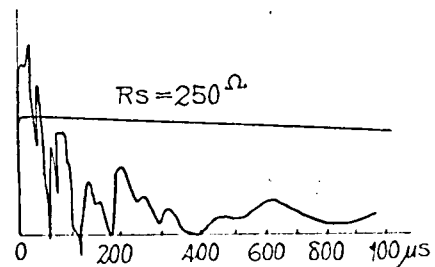
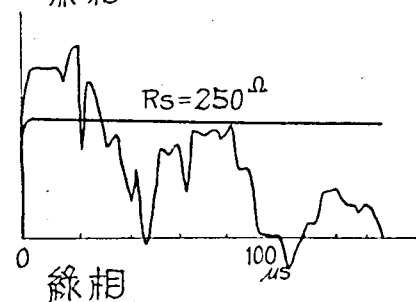
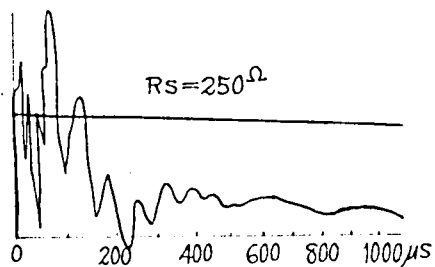
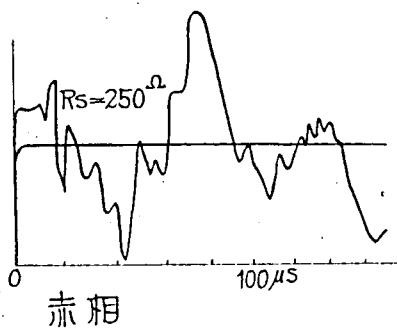
3KV 笠田動力線四郷分岐のみ残り他の分岐を全部除いた場合の インピーダンス・オシログラム



第3.20 圖



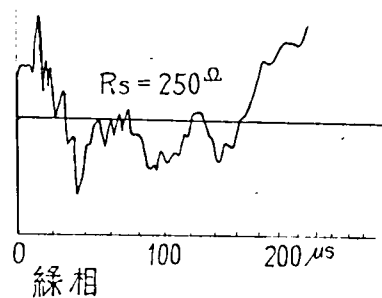
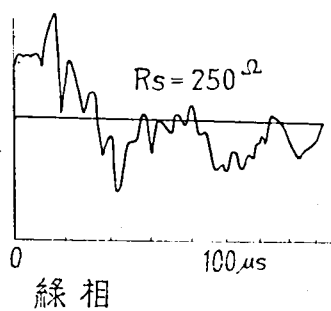
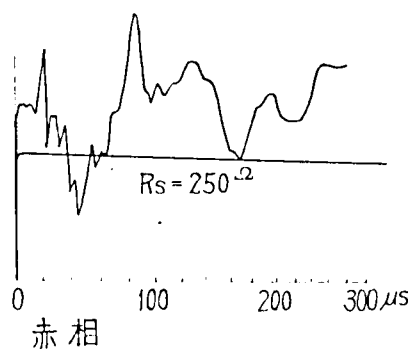
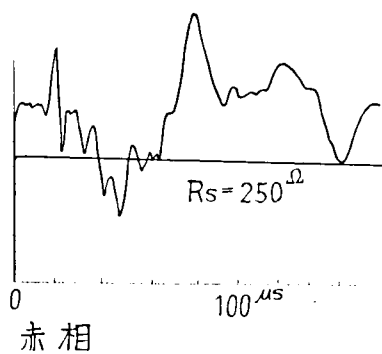
第3.21a 圖 3線~括対大地間



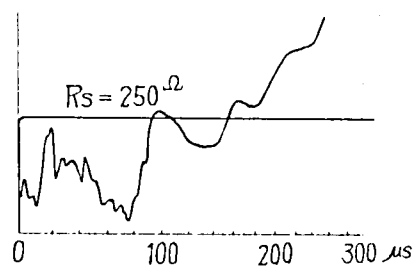
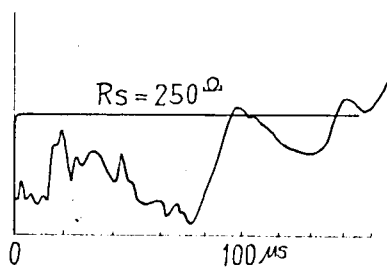
第3.21b 圖 1線対他2線接地間

3KV 笠田動力線四郷分岐のみ残り他の分岐を全部除いた場合の
 イмпีดンス・オシログラム(續)

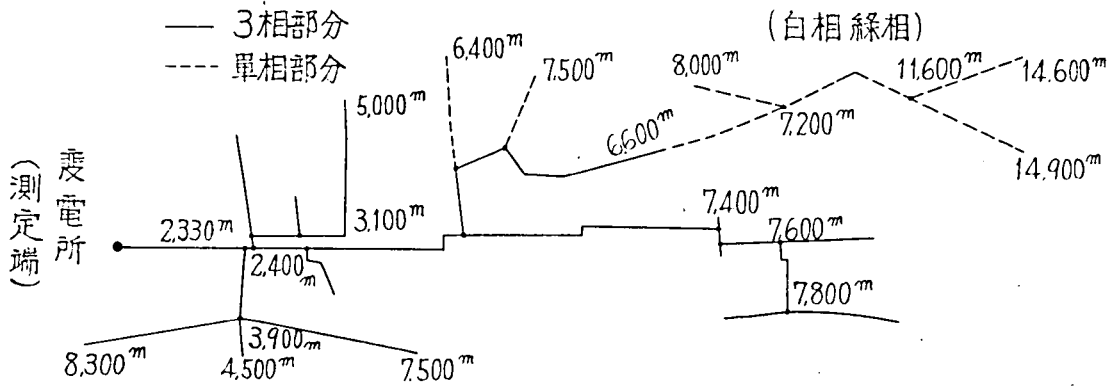
112



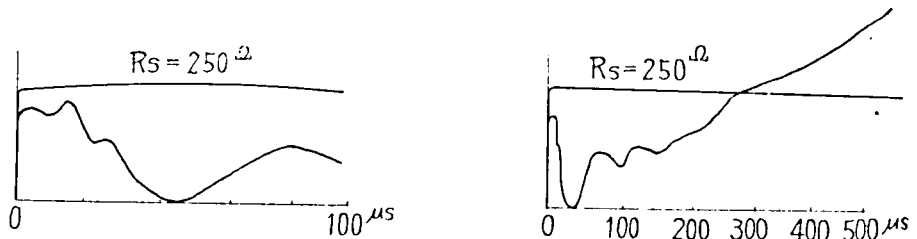
第3.21c圖 1線対大地間(他2線開放)



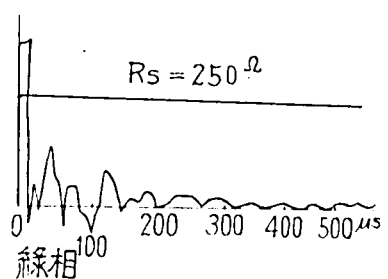
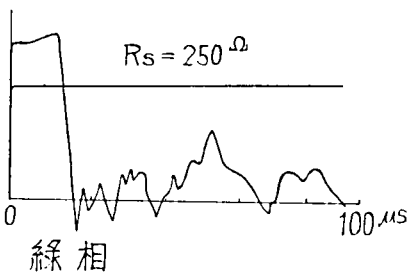
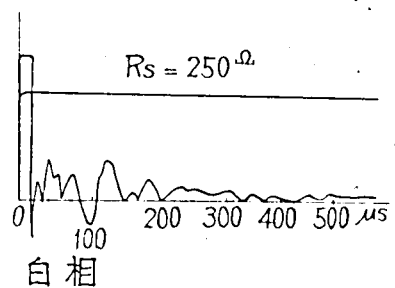
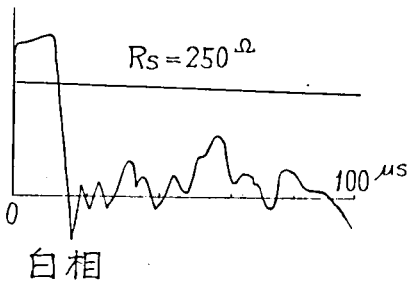
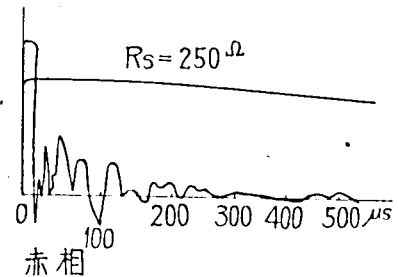
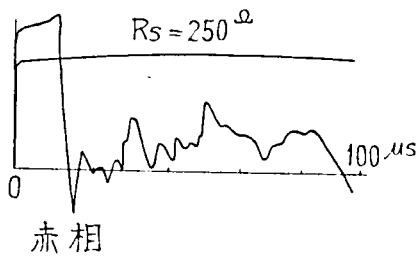
第3.21d圖 赤相に電壓印加した際緑相に現われる電壓(白相開放)



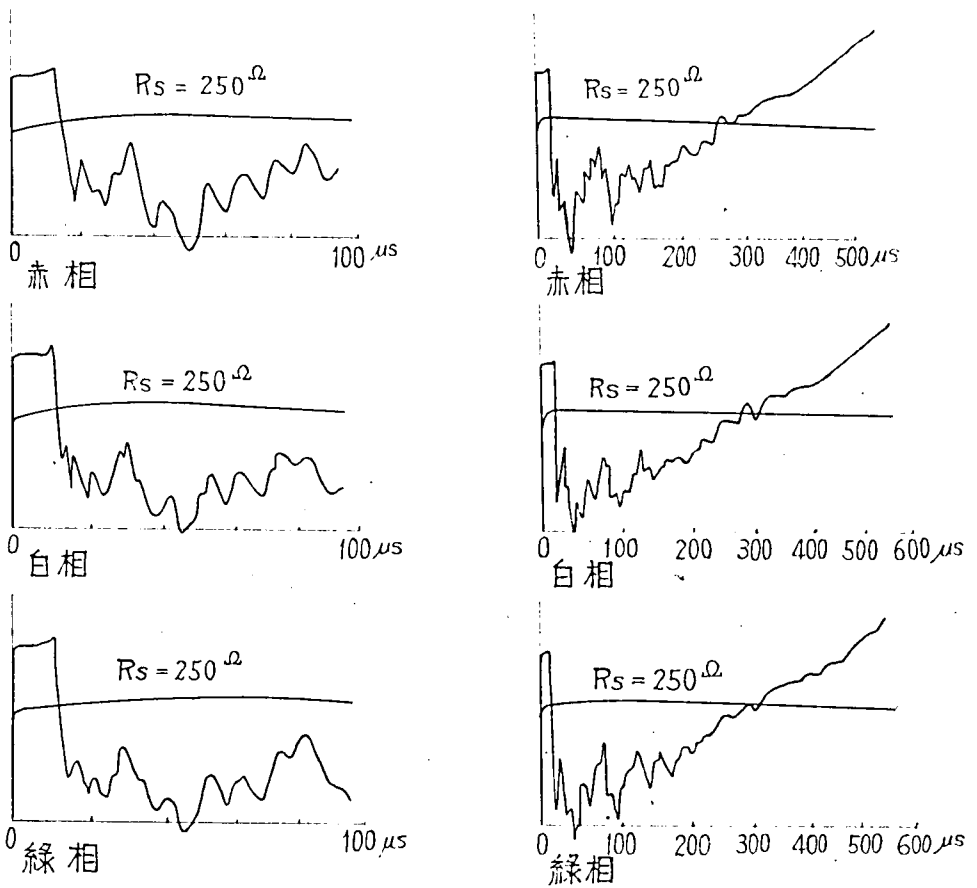
第3.22圖



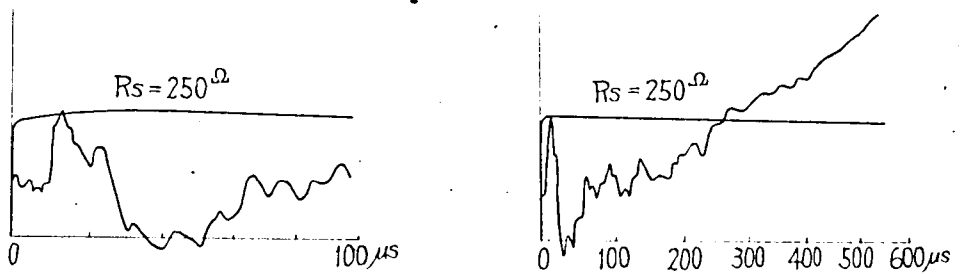
第3.23a圖 3線一括対大地間



第3.23b圖 1線対他2線接地間

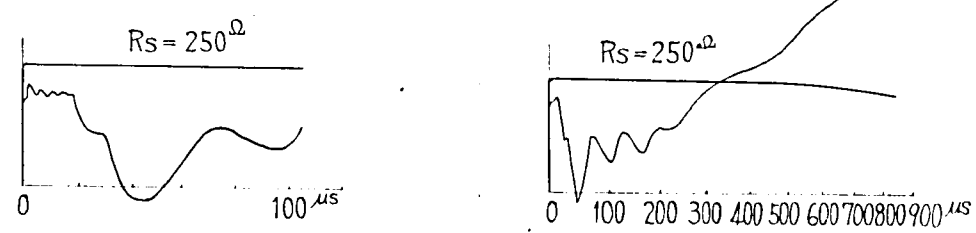
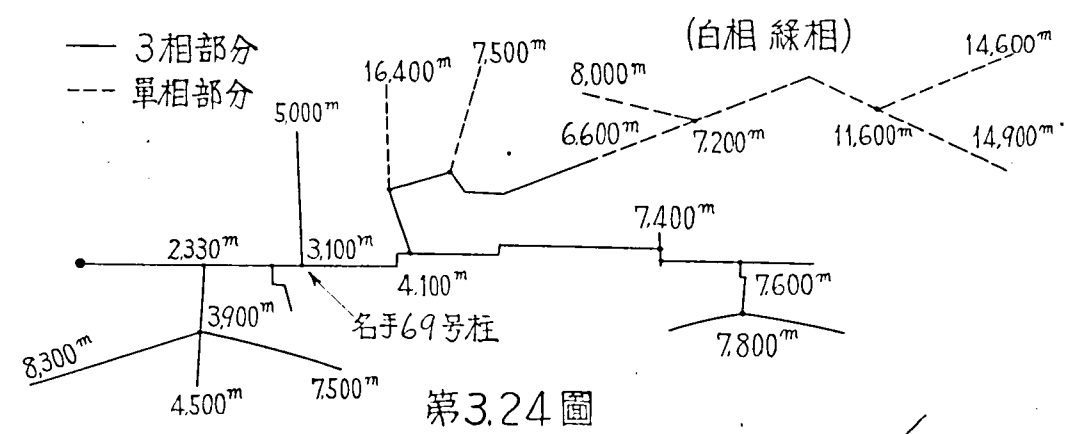


第3.23c圖 1線対大地間(他2線開放)

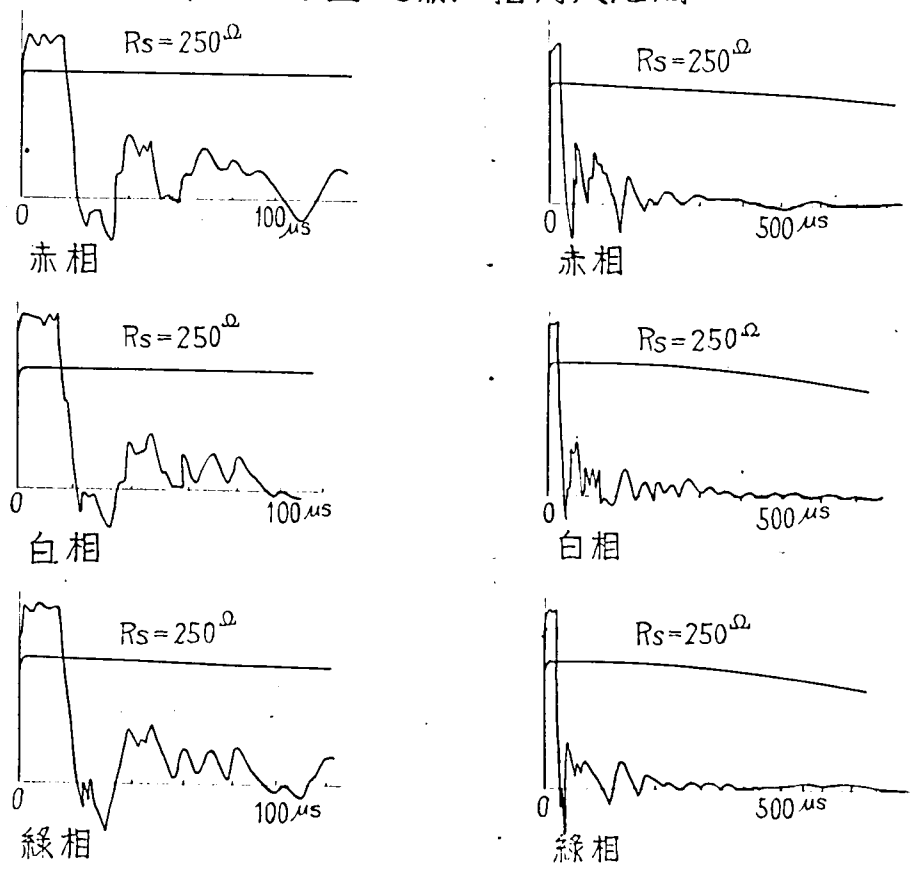


第3.23d圖 赤相に電壓印加した際緑相に現われる電壓(白相開放)

3KV 笠田動力線全線(名手50号柱の分岐を名手69号柱に変更する場合)の インピーダンス・オシログラム

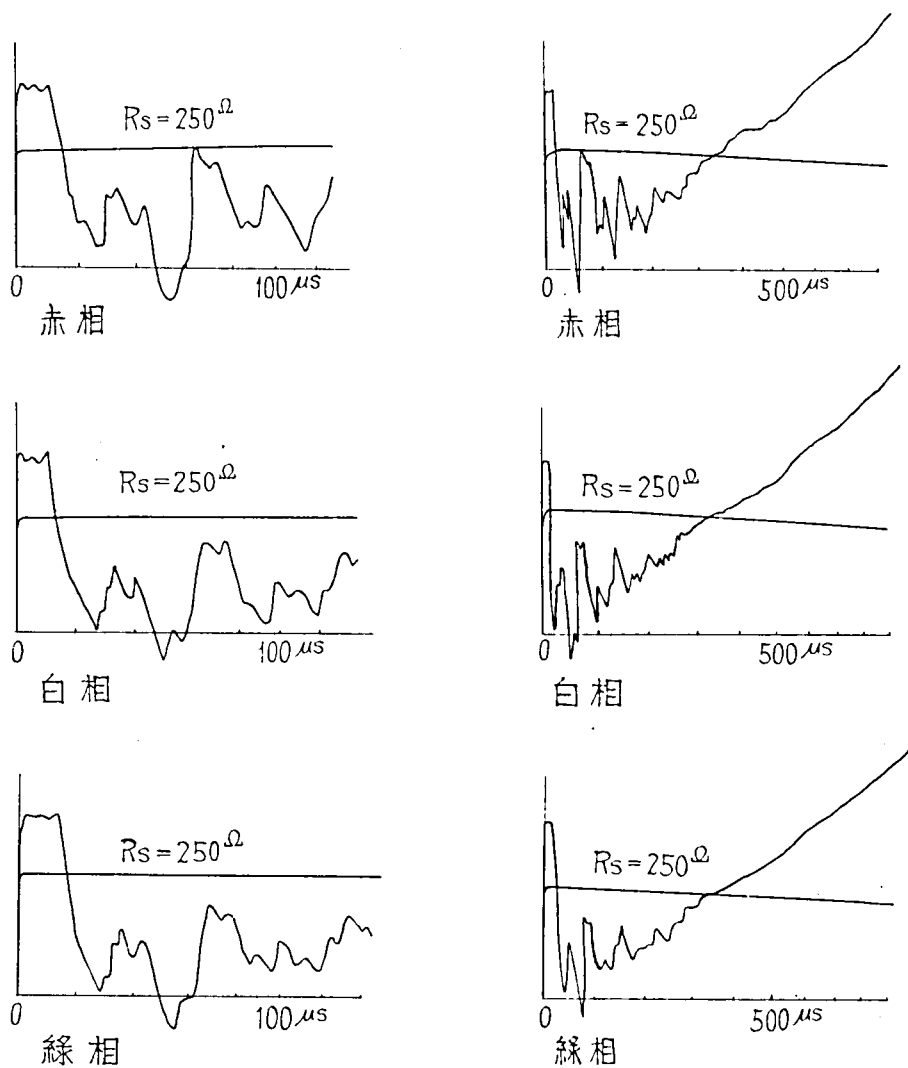


第3.25a圖 3線一括対大地間

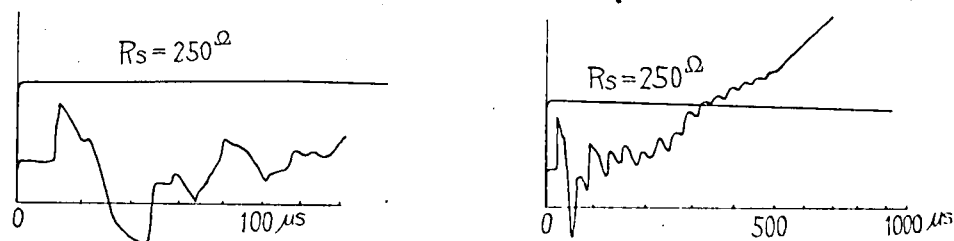


第3.25b圖 1線対他2線接地間

3KV 箕田動力線全線(名手50号柱の分岐を名手69号柱に変更せる場合)の
インピーダンス・オシログラム(續)



第3.25c 圖 1線対大地間(他2線開放)



第3.25d 圖 赤相に電壓印加した際緑相に現われる電壓(白相開放)

第3節 送配電線のインピーダンス・オシログラムより計算した線路常数

(1) インピーダンス・オシログラムより計算して得られる線路常数

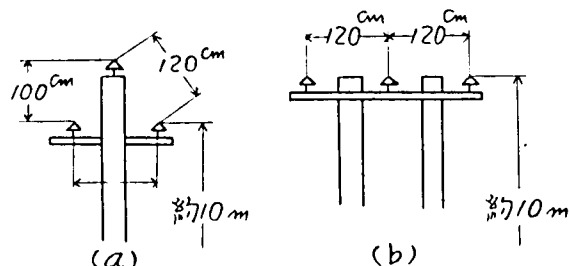
前節に得られたインピーダンス・オシログラムよりサージ・インピーダンス、伝播常数、 R_m 当たりのインダクタンス L_u 、 R_m 当たりの静電容量 C_u 、第1反射波と原印加波との波頭値の比率、終局静電容量を計算し、結果を第3.1表に同時に示す。

(2) 線路構造より計算して得られる線路常数

線路構造より送電線および配電線のサージ・インピーダンスを計算すると、結果は第3.29図のようになる。ただし送電線線路構造は第3.26図のようであり、配電線の線路構造は第3.27図のようであったので、第3.28

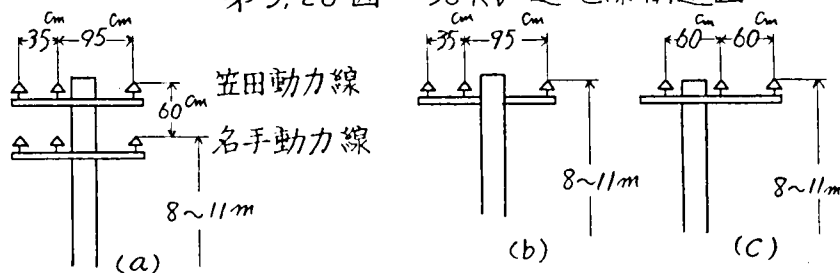
図の等価な線路構造によって計算した。第3.29図を用い逆に実測値に対する送電線の等価な地上高さを求めると第3.

2表のようになり、計算値と実測値はよく一致することを示している。



導体 $7 \times 32 \phi$

第3.26図 30 kV 送電線構造図



導体名手64号柱迄 $8 \text{ mm} \phi$ 以後 $5 \text{ mm} \phi$

第3.27図 3 kV 線路構造図

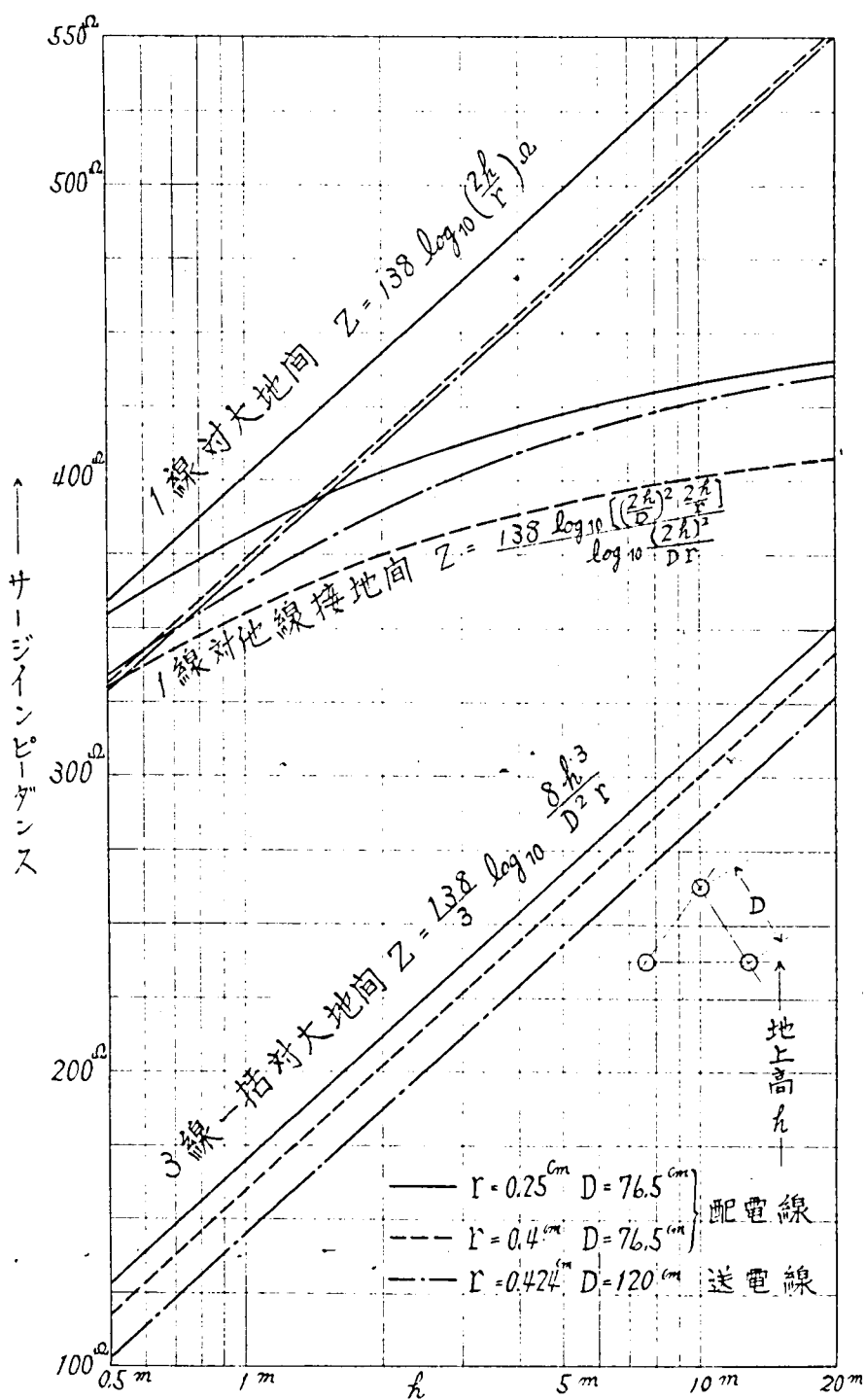
$$D = \sqrt[3]{35 \times 95 \times 130} = 76.5 \text{ cm} \text{ 配置(a)(b)に対し}$$

$$D = \sqrt[3]{60 \times 60 \times 120} = 76.5 \text{ cm} \text{ 配置(c)に対し}$$

第3.28図 3 kV 線路等価構造図

第3.1表 インピーダンス・オシログラムより算出した線路定数

		サージ インピー ダンス Z_{Ω}	線間相 互サージ インピー ダンス Z_{Ω}	伝播 速度 v $m/\mu s$	$L_u = \frac{Z}{v}$ mH/km	$C_u = \frac{1}{Zv}$ $\mu F/km$	第1反射波 原波 %	終局全静 電容量 μF	測定 オシロ グラム
30kV木 柱送電線 (17.5km)	3線一括対大地	272		294	0.925	0.0125	82	0.26	3.3a
	1線対他線接地	436		292	1.49	0.00786	75	0.14	3.3b
	1線対大地	510	135	292	1.745	0.00672	64	0.13	3.3c 3.3d
笠田動力線 2.41km先 にて開放	3線一括対大地	200		288	0.67	0.0107	86	0.06	3.5a
	1線対他線接地	380		288	1.32	0.00915	90	0.04	3.5b
	1線対大地	420	108	288	1.457	0.00825	91	0.03	3.5c 3.5d
笠田動力線 2.35km先 にて接地	3線一括対大地	193		295	0.654	0.01757	——	——	3.7a
	1線対他線接地	360		295	1.22	0.00943	72.2	——	3.7b
	1線対大地	380	104	295	1.285	0.00896	50	——	3.7c 3.7d
大宮陸路 線3.0km 先にて開放	3線一括対大地	230		290	0.8	0.015	50	0.022	3.9a
	1線対他線接地	380		290	1.3	0.0091	80	0.011	3.9b
	1線対大地	416	100	290	1.43	0.0083	70	0.011	3.9c 3.9d
大宮陸路 線3.0km 先にて接地	3線一括対大地	190		290	0.65	0.018	——	——	3.11a
	1線対他線接地	390		290	1.34	0.0088	55	——	3.11b
	1線対大地	——	——	——	——	——	——	——	
坂本幹線	3線一括対大地	168		300	0.56	0.0198			3.13a
	1線対他線接地	335		300	1.11	0.0099	——	——	3.13b
	1線対大地	350	100	300	1.18	0.0095		0.055	3.13c 3.13d
滋賀幹線	3線一括対大地	180		300	0.6	0.0185		0.055	3.15a
	1線対他線接地	310		300	1.03	0.0108		——	3.15b
	1線対大地	350	110	300	1.16	0.0095		0.055	3.15c 3.15d
上坂本動力線	3線一括対大地	120		300	0.4	0.0278		0.11	3.17a
	1線対他線接地	200		300	0.66	0.0166		——	3.17b
	1線対大地	225	120	300	0.75	0.0148		0.099	3.17c 3.17d



第3.29図 送配電線路のサージインピーダンス

第3.2表 送電線実測インピーダンスの等価地上高さ

	実測インピーダンス	等価地上高さh
3線一括対大地	272 Ω	8 m
1線対他線接地	436	1.5
1線対大地	510	6

配電線は第3.28図のような等価線路構造であるので第3.29図のインピーダンス計算図表を用いて、逆に実測値に対応する配電線の等価な地上高さを求めると、第3.3表のようになる。

第3.3表 配電線実測インピーダンスの等価地上高さ

	3線一括対大地		1線対他線接地		1線対大地	
	実測インピーダンス Ω	等価地上高さ h m	実測インピーダンス Ω	等価地上高さ h m	実測インピーダンス Ω	等価地上高さ h m
笠田終端開放 $r=0.4^m$	200	1.9	380	2.3	420	2.3
笠田終端接地 $r=0.4$	193	1.9	360	1.3	380	1.3
大宮終端開放 $r=0.4$	154	0.85	336	0.65	416	2.3
大宮終端接地 $r=0.4$	154	0.85	336	0.65	—	—
坂本 $r=0.4$	146	0.85	353	0.95	350	0.7
滋賀 $r=0.4$	159	0.9	335	0.7	350	0.7
上坂本(6)+(7) $r=0.4$	119	0.5	191	<0.5	225	—
笠田四脚分岐前まで $r=0.4$	190	1.9	330	0.65	346	0.65
笠田四脚分岐のみ $r=0.4$	188	1.9	331	0.65	360	0.85
笠田全線(1)	211	1.9	320	<0.5	365	0.85
笠田全線(2)	同	上	同	上	同	上

すなわち配電線のサージインピーダンスは並架した配電線がないと考え、その配電線のみあるとして計算した場合と実測値はいちじろしく異なり、等価地上高さが非常に小さくなっている。すなわち同じ電柱に並架してある他

の配電線がほとんど大地として働くことを示している。

第3.1表の送配電線の実際のインピーダンスの値を見てわかるように、全般として次の如き傾向がある。

- (a) 3線一括対大地間のサージ・インピーダンスは1線対他線接地間、あるいは1線対大地間（他の2線は開放）のサージ・インピーダンスの60%前後である。
- (b) 1線対他線接地間のサージ・インピーダンスは1線対大地間のサージ・インピーダンスより10～20%低い。

第4節 インデイシャル・インピーダンスの実測値より誘導される他のインピーダンス

このサージ・インピーダンスの実測値より、線路の零相インピーダンス Z_0 、正相インピーダンス Z_1 、逆相インピーダンス Z_2 、各導体の自己インピーダンス z 、および相互インピーダンス z' を求める。⁽¹⁴⁾

今、線路は対称であるから $Z_1 = Z_2$ である。

1 線対他線接地間のサージ・インピーダンス $Z_{a(1)}$ については次の関係がある。

$$\frac{1}{Z_{a(1)}} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{Z_0} + \frac{2}{Z_1} \right) \quad (3.1)$$

3 線一括対大地間のサージ・インピーダンス $Z_{a(2)}$ については次の関係がある。

$$Z_{a(2)} = \frac{Z_0}{3} \quad (3.2)$$

1 線対大地間のサージ・インピーダンス $Z_{a(3)}$ については次の関係がある。

$$Z_{a(3)} = \frac{Z_0 + 2Z_1}{3} \quad (3.3)$$

また Z_0 、 Z_1 と z 、 z' の間には次の関係がある。

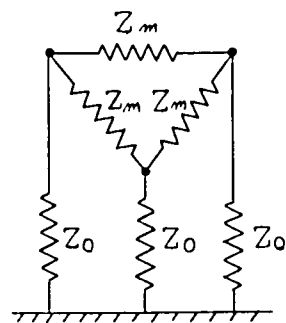
$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= z + 2z' \\ Z_1 &= z - z' \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

今、 $Z_{a(1)}$ 、 $Z_{a(2)}$ 、 $Z_{a(3)}$ に測定値を用い、 Z_0 、 Z_1 および z 、 z' を求めると第3.4表のようになる。また線路のインピーダンスが第3.30図のような関係にあると仮定すると、

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= 3Z_{a(2)} \\ Z_m &= \frac{6Z_{a(2)}Z_{a(1)}}{3Z_{a(2)} - Z_{a(1)}} \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

この値も第3.4表にあわせて記した。

a相に電圧Eを印加せる場合、開放したb相にあらわれる電圧eは $\frac{Z_0}{Z_m + Z_0} E$ である。すなわち第3.4表の値を用いてb相にあらわれる電圧は送電線では $\frac{815}{1870+815} E = 0.304 E$ であり、配電線では $\frac{600}{2075+600} E = 0.224 E$ となり、第3.3d図と第3.3c図の初期値の比 0.303および第3.5d図と第3.5c図の初期値の比 0.29と大体一致して理論と実際が合うことを示している。



第 3.30 図

第3.4表 インデイヤル・インピーダンス実測値より算出される各種のインピーダンス

	実 測 値			計 算 値				
	1線対他 線接地面 サージイン ピーダンス $Z_{a(1)}$ Ω	3線一括 対大地面 サージイン ピーダンス $Z_{a(2)}$ Ω	1線対 大地面 サージイン ピーダンス $Z_{a(3)}$ Ω	零相イン ピーダンス Z_0 $3Z_{a(2)}$ Ω	正相および 逆相インピ ーダンス $Z_1 = Z_2$ $= \frac{2Z_0 Z_{a(1)}}{3Z_0 - Z_{a(1)}}$ Ω	自己サージ・ インピーダンス Z $\frac{Z_0 + Z_1}{2}$ Ω	相互サージ・ インピーダンス Z' $\frac{Z_0 - Z_1}{3}$ Ω	線間結合 サージイン ピーダンス Z_m $\frac{6Z_{a(2)}Z_{a(1)}}{3Z_{a(2)} - Z_{a(1)}}$ Ω
送電線	436	272	510	815	376	567	160	1870
配電線	380	200	420	600	330	465	90	2075

第5節 インピーダンス・オシログラム上の反射波

第2節のインピーダンス・オシログラムによつて、送配電線上における進行波の反射現象を検討する。

3相線路のそれぞれの線上の進行波を v_a, v_b, v_c とすると、これらは3相導体上に帰路をもつ第1種進行波 v_1, v_2, v_3 、ただし

$$v_1 + v_2 + v_3 = 0 \quad (3.7)$$

および3線で全く相等しい第2種進行波 v_0 に分解でき、各相線路の電圧は

$$\left. \begin{aligned} v_a &= v_1 + v_0 \\ v_b &= v_2 + v_0 \\ v_c &= v_3 + v_0 \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

とあらわされる。

第1種進行波 v_1, v_2, v_3 は相互の導線間に帰路をもっているから、減衰、変歪は少なく、第2種進行波 v_0 はそれぞれの導線上で同じ大きさであるため大地を帰路とするので減衰および変歪が大きい。すなわち第1種進行波と第2種進行波は、減衰および変歪が全く異っているから印加波を第1種進行波と第2種進行波の各成分に分解し、それぞれの反射、減衰、変歪の現象を考えて後、合成することにより、全体の反射現象を解析することができる。

以下まず最も簡単化された配電線路より始め、順次、変圧器1個が途中に接続されたもの、簡単な分岐のある線路、さらに複雑な分岐ある線路と逐次検討する。

(1) 終端開放せる単純な配電線

第3.5 a, b, c, d 図は3 KV 笠田動力線名手50号柱にて先端開放した場合の分岐および柱上変圧器の負荷なき単純な配電線について 終端を開放し印加端より測定したインデシヤル・インピーダンスのオシログラムである。

- (a) 3線一括対大地間のインピーダンス・オシログラムについて第3.31図の如く第1種進行波と第2種進行波に分解すれば第1種進行波は零であり、第2種進行波のみであるから第3.5a図のオシログラムは第2種進行波の反射、減衰および波頭の変歪を示している。第1反射波は印加波の1.72倍である。これは規定に使用した衝電圧発生装置の出力回路のインピーダンス R_m が Z_x に比して非常に大きくとっているので反射波に対しては開放端の如く作用し、反射波の2倍の電圧が高速度ブラウン管に観測されるから、反射波として印加波の0.86が戻ってきたと考えられる。すなわちこの2.41 $k\Omega$ 長の単純線路の往復により第2種進行波は約86%に減衰することを示している。

線路長 l km のとき指数 $e^{-\alpha l}$ に従って進行波が減衰すると考えると、この場合指数減衰係数 $\alpha = 0.031/km$ となる。これを第3.31図に図解する。

- (b) 1線対他線接地のインピーダンス・オシログラムについて第3.32図のように印加した矩形波を E とすると

$$V_a = E \quad V_b = 0 \quad V_c = 0$$

となる。

これは第2種進行波

$$V_0 = \frac{E}{3} = 0.33E$$

と、第1種進行波

$$V_1 = V_a - V_0 = E - 0.33E = 0.66E$$

$$V_2 = V_b - V_0 = 0 - 0.33E = -0.33E$$

$$V_3 = V_c - V_0 = 0 - 0.33E = -0.33E$$

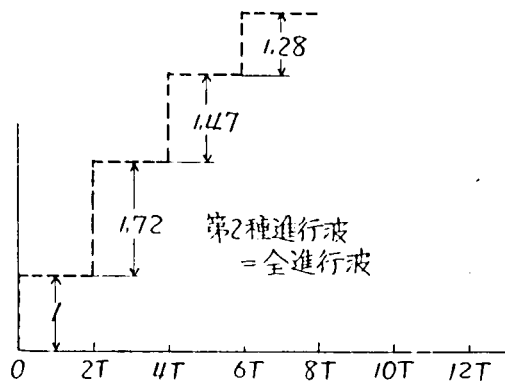
とに分割される。

(a)と同じく電圧印加端には反射波の2倍の電圧があらわれる。オシログラム上の第1反射波は $1.8E$ である。そのうち第2種進行波の成分は(a)と同じ減衰をし、線路の1往復により0.86倍に減衰すると考え、すなわち $2 \times 0.86 \times 0.33E = 0.566E$ が第2種進行波の成分として

3KV 笠田動力線名手50号柱にて終端開放時の反射波形

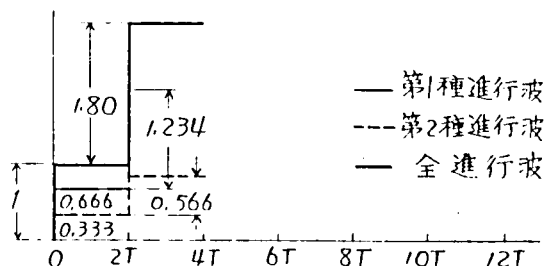
入射波	相	第1種進行波	第2種進行波
E	V_a	0	E
E	V_b	0	E
E	V_c	0	E

第3.31図 3線一括対大地間



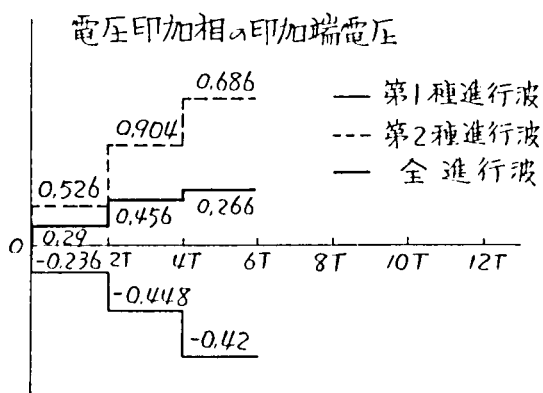
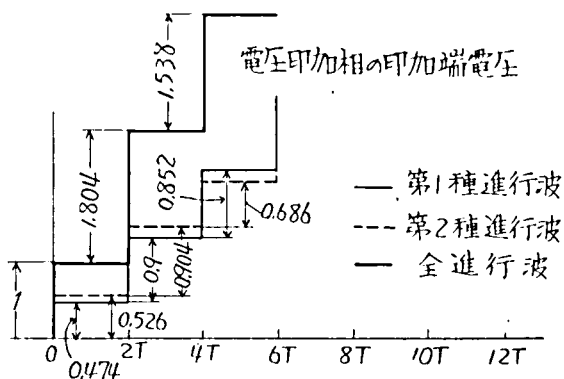
入射波	相	第1種進行波	第2種進行波
E	V_a	0.666 E	0.333 E
0	V_b	-0.333 E	0.333 E
0	V_c	-0.333 E	0.333 E

第3.32図 1線対他2線接地間



入射波	相	第1種進行波	第2種進行波
E	V_a	0.474 E	0.526 E
0.29E	V_b	-0.236 E	0.526 E
0.29E	V_c	-0.236 E	0.526 E

第3.33図 1線対大地間
(他2線開放)



ブラウン管に観測される。これを全体の第1反射波 $1.8E$ より引いて $1.234E$ が第1種進行波成分の第1反射である。従って印加波 $0.66E$ の2倍でこれを割ったもの $\frac{1.234E}{2 \times 0.66E} = 0.95$ が第1種進行波の線路1往復伝播後の減衰係数である。

以後の反射については印加端では a 相は開放、 b , c 相は接地であるから a 相では正の反射、 b , c 相では負の反射が進行することとなる。

第1回目に印加端に戻って来る波は、第1種進行波成分と第2種進行波成分を加えて

$$V_{ar1} = 0.95 \times 0.66E + 0.86 \times 0.33E = 0.633E + 0.287E = 0.92E$$

$$V_{br1} = 0.95 \times (-0.33E) + 0.86 \times 0.33E = -0.316E + 0.287E = -0.029E$$

$$V_{cr1} = 0.95 \times (-0.33E) + 0.86 \times 0.33E = -0.316E + 0.287E = -0.029E$$

このうち V_{ar1} は反射され、 V_{br1} , V_{cr1} は負反射されるから印加端で反射される電圧波は

$$V_{as2} = V_{ar1} = 0.92E$$

$$V_{bs2} = V_{br1} = 0.029E$$

$$V_{cs2} = V_{cr1} = 0.029E$$

これを再び第1種および第2種進行波に分けて検討する。すなわち第2種進行波としては

$$V_{0s2} = \frac{0.92 + 0.029 + 0.029}{3} E = \frac{0.978}{3} E = 0.326E$$

第1種進行波

$$V_{1s2} = V_{as2} - V_{0s2} = (0.92 - 0.326)E = 0.594E$$

$$V_{2s2} = V_{bs2} - V_{0s2} = (0.029 - 0.326)E = -0.297E$$

$$V_{3s2} = V_{cs2} - V_{0s2} = (0.029 - 0.326)E = -0.297E$$

とに分割して新たにこの瞬間以後を検討する必要がある。

- (C). 1線対大地間、他線開放のインピーダンス・オシログラムについて、第3.33図のように印加した矩形波を E とすると、電圧を印加しない相にも誘導により電圧があらわれる。第3.30図の Z_0 , Z_m の考え方を使用すると、3線に印加された電圧は

$$V_a = E$$

$$V_b = \frac{Z_0}{Z_0 + Z_m} E = \frac{600}{600 + 2075} E = 0.224 E$$

$$V_c = \frac{Z_0}{Z_0 + Z_m} E = \frac{600}{600 + 2075} E = 0.224 E$$

となるが実際はインピーダンス・オシログラム第3.5d図および第3.5c図を比較することにより、

$$V_a = E$$

$$V_b = 0.29 E$$

$$V_c = 0.29 E$$

であるからこれを基として計算すると、第2種進行波

$$V_0 = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} = \frac{1 + 0.29 + 0.29}{3} E = 0.526 E$$

と、第1種進行波

$$V_1 = V_a - V_0 = (1 - 0.526) E = 0.474 E$$

$$V_2 = V_b - V_0 = (0.29 - 0.526) E = -0.236 E$$

$$V_3 = V_c - V_0 = (0.29 - 0.526) E = -0.236 E$$

とに分割される。

(b)で得た第1種進行波の1往復による減衰係数 0.95 を V_1 , V_2 , V_3 にかけて

$$0.95 V_1 = 0.95 \times 0.474 = 0.45 E$$

$$0.95 V_2 = 0.95 V_3 = 0.95 \times (-0.236) = -0.224 E$$

また、印加端は開放端と考えて良いから高速度ブラウン管により観測される電圧は2倍となり、それぞれ $0.9 E$ および $-0.448 E$ となる。

(a)項で得た第2種進行波の線路1往復による減衰係数 0.86 を第2種進行波成分 $V_0 = 0.526 E$ にかけて、

$$0.86 \times 0.526 E = 0.452 E$$

この2倍 $0.904 E$ が観測される。すなわち印加端にて観測される電圧の第1回反射波は

$$\text{電圧印加線路で} \quad 0.45 E + 0.452 E = 0.902 E$$

の2倍で $1.804 E$ が観測され
 電圧非印加線路で $-0.224 E + 0.452 E = 0.228 E$
 の2倍で $0.456 E$ が観測される。

さらにオシログラムに示されてはいないが、この線路のインディシヤルインピーダンスの測定回路では印加端も終端も開放と考えて良いので線路は3相に対して印加端、終端共に対称であるから、第1種進行波より第2種進行波を生ずることなく、第2種進行波より第1種進行波を生ずることがないので第2回目の反射波に対しては、それぞれの線路1往復の減衰係数の2乗をかければよく、

第1種進行波は $(0.95)^2 \times 0.474 E = 0.9 \times 0.474 E = 0.426 E$
 $(0.95)^2 \times (-0.236 E) = 0.9 \times (-0.236 E) = -0.21 E$

第2種進行波は $(0.86)^2 \times 0.464 E = 0.74 \times 0.464 E = 0.343 E$

すなわち第2回反射波としてあらわれる電圧は

電圧印加相では $0.426 E + 0.343 E = 0.769 E$

電圧非印加相では $-0.21 E + 0.343 E = 0.133 E$

従って測定される電圧としてはこれらの2倍で $1.538 E$ および $0.266 E$ となる。

以上(1)項にのべたことからの結果をまとめて第3.5表に示す。

第 3.5 表

		入射波	送電端へ 第1反射波
3線一括 対大地間	全進行波=第2種進行波成分(測定値)(1)	1	1.72
	線路往復間の第2種進行波の減衰係数(2)		0.86
1線対他 線接地	全進行波 (測定値)(3)	1	1.8
	第2種進行波成分(1) \times 0.33 (4)	0.33	0.566
	第1種進行波成分(3) - (4) (5)	0.66	1.234
	線路1往復間の第1種進行波の減衰係数(6)		0.95

1線対大地間 (他線開放) 電圧印加相	全進行波 (測定値) (7)	1	1.82
	第2種進行波成分 (1) $\times 0.526$ (8)	0.526	0.91
	第1種進行波成分 (7) - (8) (9)	0.474	0.91
	線路往復間の第1種進行波の減衰 (10)		0.95
1線対大地間 (他線開放) 電圧非印加相	全進行波 (測定値) (11)	0.29	0.46
	第2種進行波 (1) $\times 0.526$ (12)	0.526	0.900
	第1種進行波 (11) - (12) (13)	-0.236	-0.448
	線路1往復間の第1種進行波の減衰 (14)		0.95

(2) 終端抵抗接地された単純な配電線

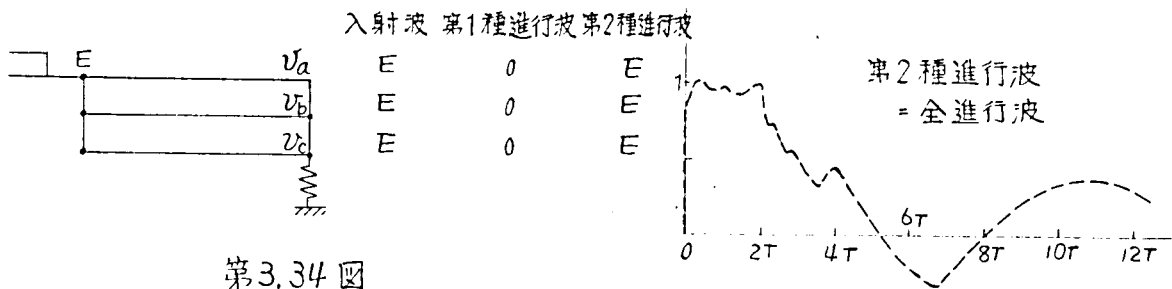
3 KV 笠田動力線名手 48 号柱まで 2.33 km の配電線の終端にて 3 線一括して接地抵抗を通して接地した場合のインピーダンス・オシログラム第 3.7a, b, c, d 図について考察を進める。この場合接地抵抗はコーラウシュ・ブリッジで測って 25 Ω であったが衝突電圧に対しては非直線的な特性を持っているので、これがため得られたインピーダンス・オシログラムは(1)項の場合に比し、やや複雑な波形を示している。

(a) 3 線一括対大地間のインピーダンス・オシログラムについては第 1 種進行波の成分はなく、第 3.34 図のように第 2 種進行波による反射波の状況を示すもので接地抵抗が複雑な特性をもっていることを示している。

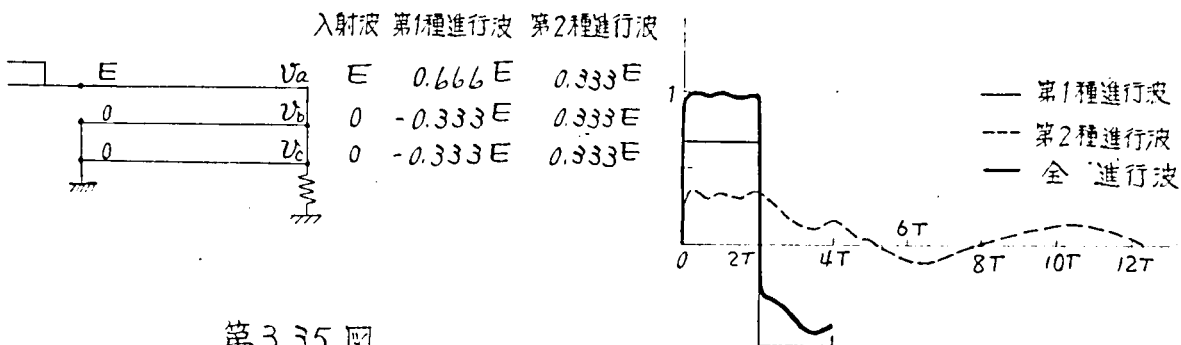
(b) 1 線対他線接地間のインピーダンス・オシログラムについては第 3.35 図のように第 1 種進行波 0.666E, -0.333E, -0.333E と、第 2 種進行波 0.333E に分解して考える。第 1 種進行波は先の(1)項におけるように線路の 1 往復で 95% に減衰し、終端は短絡されているから完全に負反射すると考えて、第 1 種進行波の印加端電圧を描く。第 2 種進行波については上述(a)と同様の減衰および変歪をすると考え、第 3.34 図の電圧波形を 0.33 倍して第 2 種進行波にもとづく印加端電圧を得る。この第 1 種進行波と第 2 種進行波の印加端電圧を加え合わせたものが実際の全印加端電圧となる。この第 3.35 図と第 3.7 b 図の第 1 反射波はよく一致するが、それ以後の電圧については印加端で 1 線は高抵抗を通

3KV 笠田動力線名手48号柱にて終端抵抗接地
の時の反射波形

132

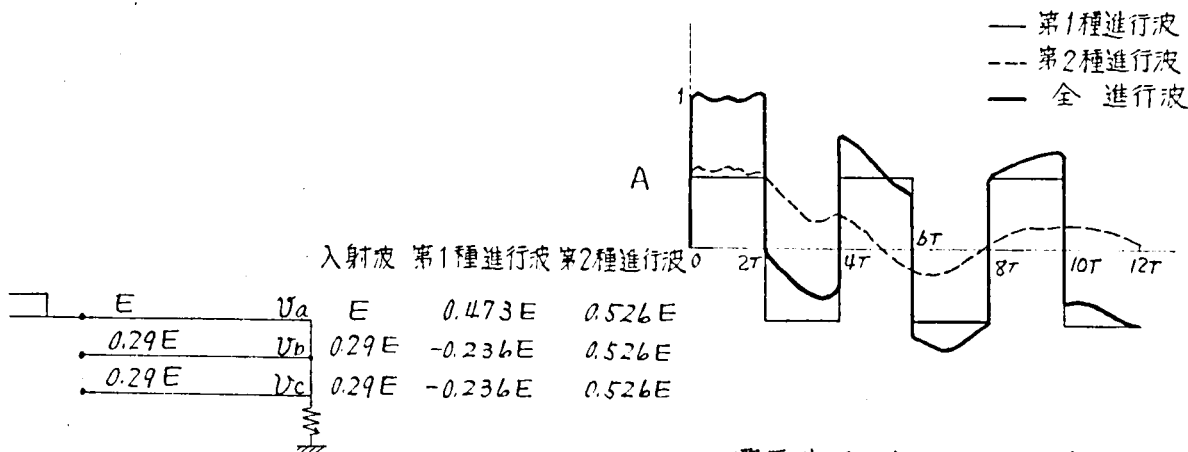


第3.34 図



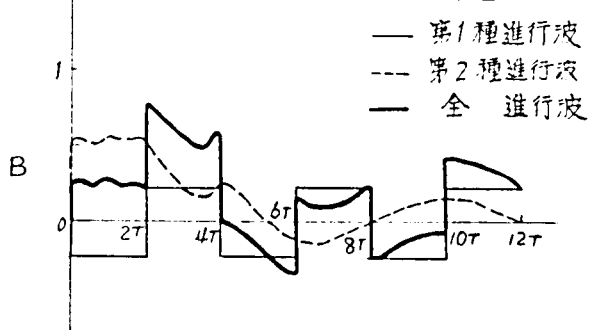
第3.35 図

電圧印加相の印加端電圧



第3.36 図

電圧非印加相の印加端電位



して衝電圧発生装置につながれているので開放端の如くはたらし、他の2線は接地されているので"対称な回路でないために、終端よりの第1反射波が印加端にて再反射した瞬間以後は、再び新たに第1種および第2種進行波に分解して解析しなければならず、かつ第1反射中の第2種進行波は第3.34図の曲線を用いて求めるより方法がないので計算、作図は非常に困難である。

(C) 1線対大地間のインピーダンス・オシログラムについては第3.7C図、第3.7d図の初期の電圧値が各線への印加電圧を示す。

(1)(C)と同様

$$V_a = V$$

$$V_b = 0.29 V$$

$$V_c = 0.29 V$$

これを第1種進行波

$$V_1 = 0.473 V$$

$$V_2 = -0.236 V$$

$$V_3 = -0.236 V$$

と、第2種進行波

$$V_0 = 0.526 V$$

に分解し、第3.36図に示す。

前述(1)項と同じく第1種進行波は線路の1往復で0.95に減衰し、第2種進行波は第3.34図の曲線に示すような減衰をすると考える。

この場合印加端は3線共開放、終端は3線を短絡して抵抗接地しているので、両端共に3相線路が対称であるから、反射現象により第1種進行波より第2種進行波が、第2種進行波より第1種進行波が生起することはないから、(b)項と異なり第2回目以後の反射波についても印加したときの第1種進行波、第2種進行波それぞれ別の減衰、変歪をすると考えてよく、これを合成すれば

電圧印加相については 第3.36図Aとなり

電圧非印加相については 第3.36図Bのようになり

共に既述の第3.7Cおよびd図のインピーダンス・オシログラムと良く一致する。

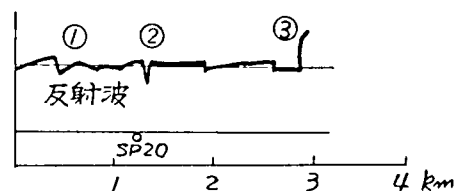
ことに電圧非印加相の第1反射波にかなり大きな正の反射波が終端接

地の場合あらわれるのは第1種進行波の減衰の小さいことを示しており、第1種進行波と第2種進行波と分かれて伝播することの顕著な例証である。

(3) 途中に単相変圧器のある終端開放せる単純な配電線

大宮川連絡線は長さ3 kmで、坂本変電所と大宮川発電所を接続する3KVの線路で途中変電所より1.3 kmのところに単相20 KVAの変圧器を接続している。

そのインピーダンス・オシログラムは第3.9 a, b, c図のようであるが、これの反射波を線路の距離に従って描けば第3.37図となる。そして途中の変圧器のところで負の反射②が変電所に来ることを示している。ただし変圧器の接続されていない線ではこの負反射は非常に小さくしか出ていない。そして線路の終端で正反射③が到来する。



第3.37図 大宮川連絡線における反射波と距離の関係

しかもその負反射②は短時間の *dip* でこの *dip* が終わればはじめと同じ高さのインピーダンスにもどっている。この *dip* の期間は約 $2 \times 10^{-7} \mu s$ であり、変圧器の等価回路の端子間静電容量約 500 pF を線路のサージインピーダンス 400 Ω を通して充電するときの時定数は $500 \text{ pF} \times 400 \Omega = 2 \times 10^{-7} \mu s$ であって一致することを示している。

負反射①は変電所を出てしばらく同一電柱の上に架設してあった他の回線が離れて行く位置に相当し、サージインピーダンスの高い分岐線があるように働いている。

(4) 途中に単相変圧器のある終端抵抗接地せる単純な配電線

(3)項の大宮川連絡線を大宮川発電所において抵抗接地したもののインピーダンス・オシログラムは第3.11 a, b, c図に示される。

a) 3線一括対大地間のインピーダンス・オシログラムは、第2種進行波

のこの配電線の中の減衰および変歪を示しているが、(2)項に比して減衰、変歪共にいちじるしく大きいようである。

b) (3) 項同様 20 KVA 単相柱上変圧器の負の dip があらわれている。勿論変圧器の接続されていない相ではこの dip は誘導であらわれるのでいちじるしく小さい。また(2)項に比して線路終端接地の負反射が大きくなり、インピーダンスの零線より下る程度が少ない。すなわち第1種進行波の減衰が大きいことを示しているが、変圧器の接続されている線も、されていない線も同程度であるので変圧器の影響とは考えられず、線路自身の特性であると考えられる。

(5) 分岐1個のみある送電線

粉河 — 笠木間 17.644 km の 30 KV 木柱送電線は、粉河より 3.285 km 離れた地真に長さ 1.543 km の飯盛分岐線があり、終端および分岐線の終端を開放した場合の印加端よりみたインピーダンス・オシログラムは第3.3図 a, b, c, d に示すようであり、分岐線の反射現象がよく観察される。分岐点における進行波の反射係数および透過係数は、本線および分岐線共に同一サージインピーダンス Z であるので

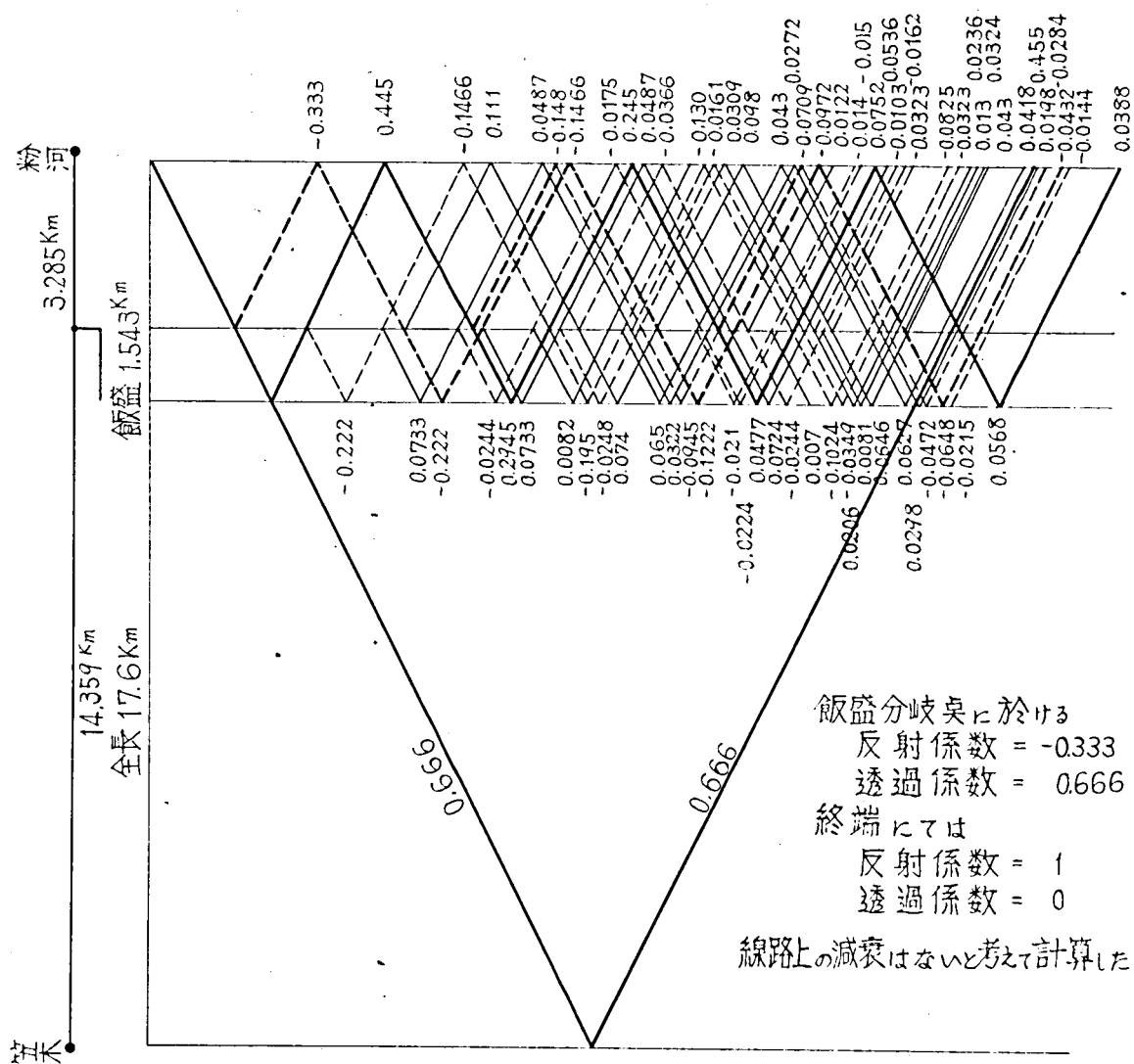
$$\text{反射係数} = \frac{Z - 2Z}{Z + 2Z} = -\frac{1}{3} = -0.333$$

$$\text{透過係数} = \frac{2Z}{Z + 2Z} = \frac{2}{3} = 0.666$$

勿論開放端における反射係数は +1、透過係数は 0 である。

また終端および印加端は開放端であり、(第2京大法の測定回路で $R_m \gg Z$ であるので印加端も開放端と考えてよい) 3相線路はすべてにおいて平衡しているので、第1種進行波より第2種進行波を生ずることなく、第2種進行波より第1種進行波を生ずることがないので、第1種進行波と第2種進行波の伝播現象は独立に考えてよく、いちじるしく複雑な現象は起らない。

反射波の状態を格子図によつて計算した結果および測定したインピーダン



第3.38 圖

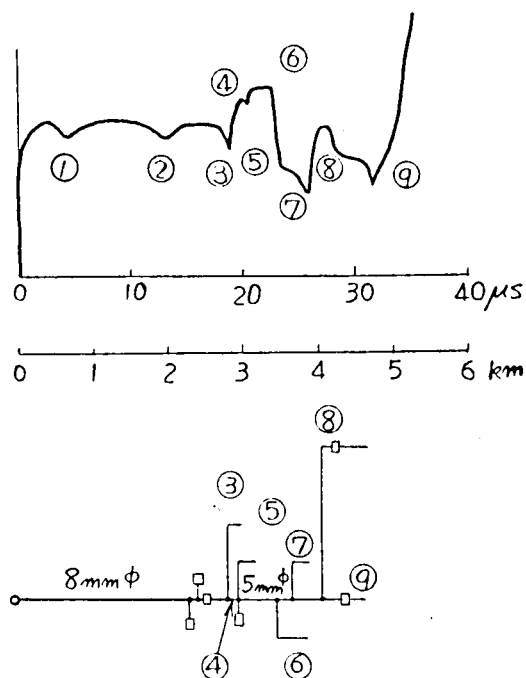
ス・オシログラムを第3.38図に示す。飯盛 分岐点における負反射および分岐終端の正反射が明瞭にあらわれている。しかもこの分岐線の正負の両反射波は印加端および分岐の開放端の間を数回往復して矩形波電圧印加の瞬時より割って $23 \sim 33 \mu\text{s}$ の間に第1反射波、 $56 \sim 60 \mu\text{s}$ の間に第2反射波、 $70 \sim 95 \mu\text{s}$ の間に第3反射波があらわれ、 $121 \sim 127 \mu\text{s}$ の間の笠木終端開放による正の全反射の立ち上りの部分に第4反射波があらわれる。

尚飯盛分岐線の第1反射波が帰って来るまでの $23 \mu\text{s}$ の間にインピーダンスに多少の変動が認められるのは、分岐点までの線路導体の転位によるサージインピーダンスの僅かな変化によるものである。

インピーダンス・オシログラム上の減衰および反射は、前項配電線におけると同様に1線対他線接地の場合に比し、1線対大地間の場合が減衰および変歪が大きい。第3.3d図の1線に電圧印加せる際、他線にあらわれる電圧には第1種進行波による反射現象が顕著に観察される。すなわち矩形波電流を印加した相の電圧が反射波により急変する瞬間、他の相の電圧は印加相の反射電圧と逆極性の電圧があらわれる。

(6) 少数の分岐をもった配電線

(a) 3KV 笠田動力線で分岐を全部除き、田郷分岐直前まで5 Kmの配電幹線にて終端開放せる場合のインピーダンス・オシログラムは第3.19図のようであり、これにあらわれている反射波の状況は、線路分岐の多いこと、および柱上変圧器の存在のために相当複雑である。減衰が少なくて反射波が



第3.39図 3KV 笠田動力線田郷分岐直前までの幹線にて終端開放せる場合

もつと顕著にあらわれる。1線対他線接地について反射波と線路の分岐状況を描けば第3.39図の如くなる。ただし反射点までの往復距離がその伝播時間に対応するように $10\mu\text{s}$ と 1.5 km を同寸法として描いた。

反射波中、負反射①②は測定した線路上の各点に目立った不連続がないようであるから並架線路の状態変化によるものと思われる。負反射③は分岐③によるものと考えられる。正反射④は分岐③の終端反射である。負反射⑤⑥⑦は分岐⑤⑥⑦によるもの、正反射⑧は分岐⑥⑦の終端より正反射が大体同時に来たもの、負反射⑨は分岐⑧によるもの、最終の正反射は終端⑨によるものと考えられる。系統図の点④にて導体直径が 8 mm より 5 mm に変更され、サージインピーダンスが増すが8%程度の増加であるので、その正反射は僅かであり他の反射波のほうが大きいので観測できない。

(b) 坂本幹線のインピーダンス・オシログラムは第3.13図に示され、反射波の状況と線路の分岐線および変圧器の分布の状況を描くと第3.40図となる。印加端よりみてはじめての分岐では短いものでもかなり明瞭な負反射①を示す。短い分岐があるごとに小さな反射波の *dip* があり、数個の分岐の終端に同時に進行波が到達するような状況になっていると、かなり大きな正の反射波②が返ってくることを示している。しかも分岐の数の方が多い場合は最長の線が終端になったとき③よりも正反射は大である。

(c) 滋賀幹線のインピーダンス・オシログラムは第3.15図に示され、反射波の状況と線路の分岐線および変圧器の分布の状況を描くと第3.41図のようになる。はじめての分岐がかなり長いので明瞭な負反射①が観察される。終端の正反射②も明瞭にあらわれる。その他の分岐および変圧器による負反射は小さな *dip* として見られるが明瞭でない。

(d) 上坂本動力線は坂本幹線と滋賀幹線を変電所にて並列に同一O.C.Bに入れたものであるが、このインピーダンス・オシログラムは第3.17図である。これについては何れが何の反射であることを判定することはできない。一般の配電線はかかる状態が普通であろう。

第3.40 圖 坂本幹線における反射波と距離の関係

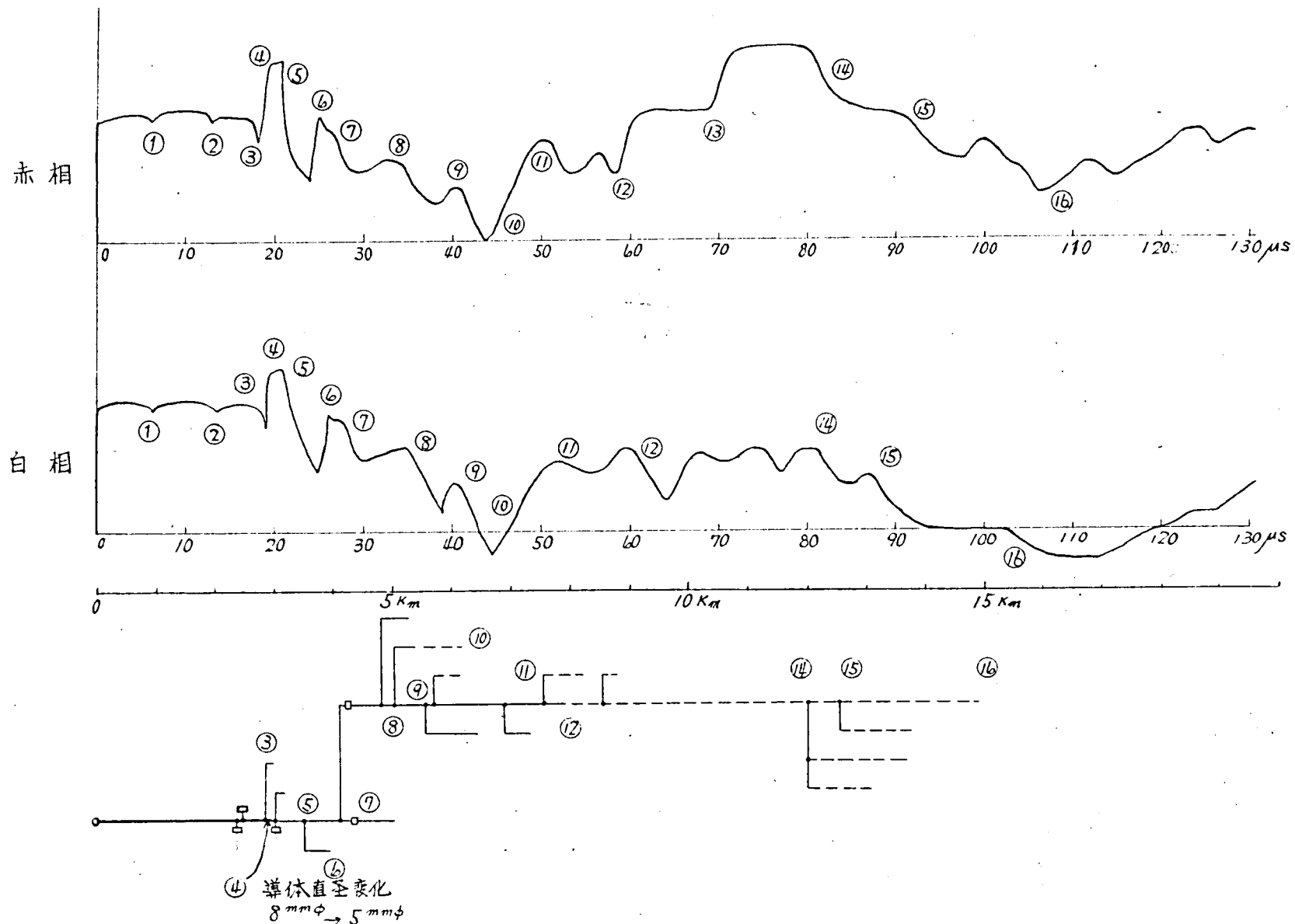
第3.41圖 滋賀幹線における反射波と距離の関係

(7) 複雑なる分岐のある配電線

(a) 3 kV 笠田動力線にて田郷分岐のみを残して、他の分岐を全部除いた場合のインピーダンス・オシログラムは第3.21図のようである。反射波の状況は非常に複雑であるので、反射のもつともいちじるしくあらわれている1線対他線接地の場合につき、反射波と線路の分岐の状況を描けば第3.42図の如くなる。

同図中①～⑥の反射波は(b)(a)項で述べた反射波と同一のものである。負反射⑦は分岐⑦によるもの、負反射⑧⑨はそれぞれ線路上⑧⑨点にある分岐によるもの、正反射⑩は分岐⑧⑨の終端における正反射の合成である。負反射⑪は分岐⑪によるものである。⑫の赤相における正反射は赤相が終端開放となつているためのものであり、⑫の緑相の負反射は⑫点にて緑相および白相にある分岐によるものと考えられる。赤相線路上における⑬の正反射は分岐⑪の終端の反射がさらにもう一度⑫の赤相線路の終端で反射したものであろう。緑相⑭⑮の負反射は分岐⑭⑮によるものであり、正反射⑯は線路末端⑯による正反射であろうと考えられる。

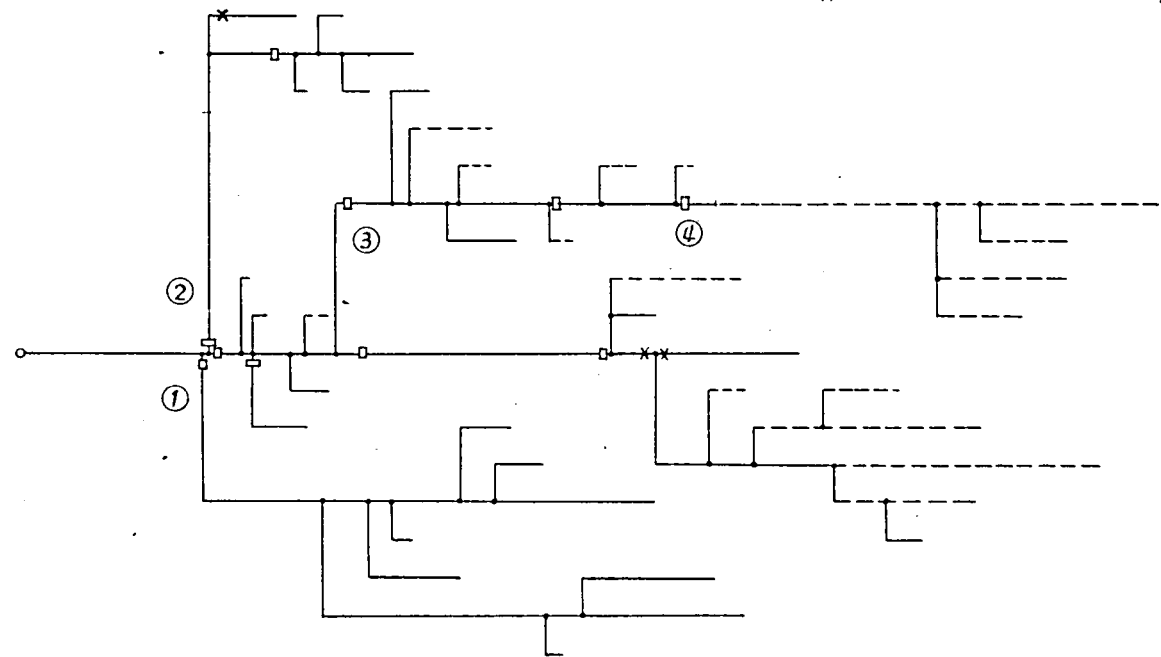
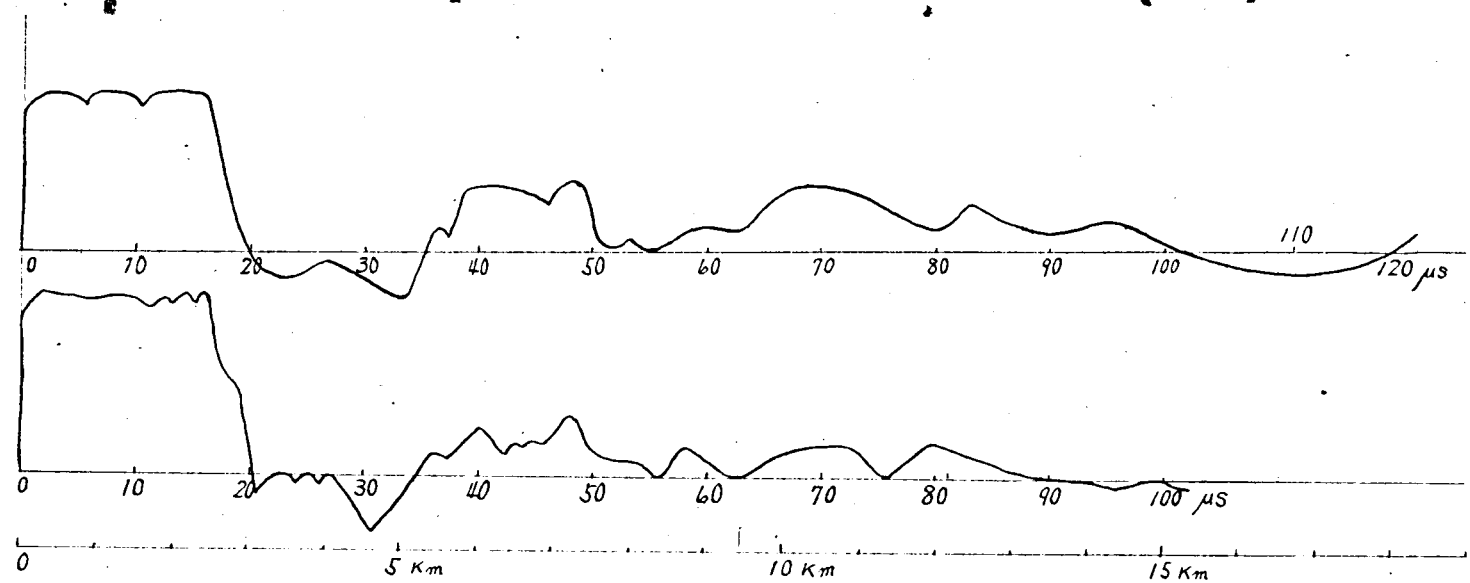
(b) 3 kV 笠田動力線全線のインピーダンス・オシログラムは第3.23図および第3.25図に示すようであり、その反射波の状況は非常に複雑である。前項同様減衰および変歪の少ない1線対他線接地の場合について、反射波と線路の分岐状態を描けば、第3.43図および第3.44図のようになる。第3.44図は第3.43図で変電所より2.4 kmの地点にあった分岐②を3.1 kmの地点に接続換えしたものである。このため第3.43図と第3.44図とは17～33 μ sの間においていちじるしく異なり、以後も相当異つている。また分岐③の赤相が点④で終端となつているための影響は、前の(5)の場合のようには顕著ではなく、唯60～90 μ sの期間に赤相の電圧が白相および緑相より幾分大きい。すなわち配電線全体としては相当長い単相部分があつてもほとんど影響されないことがわかる。このような複雑な分岐のある一般の配電線では各反射波が何れの分岐に対応するか判別困難である。



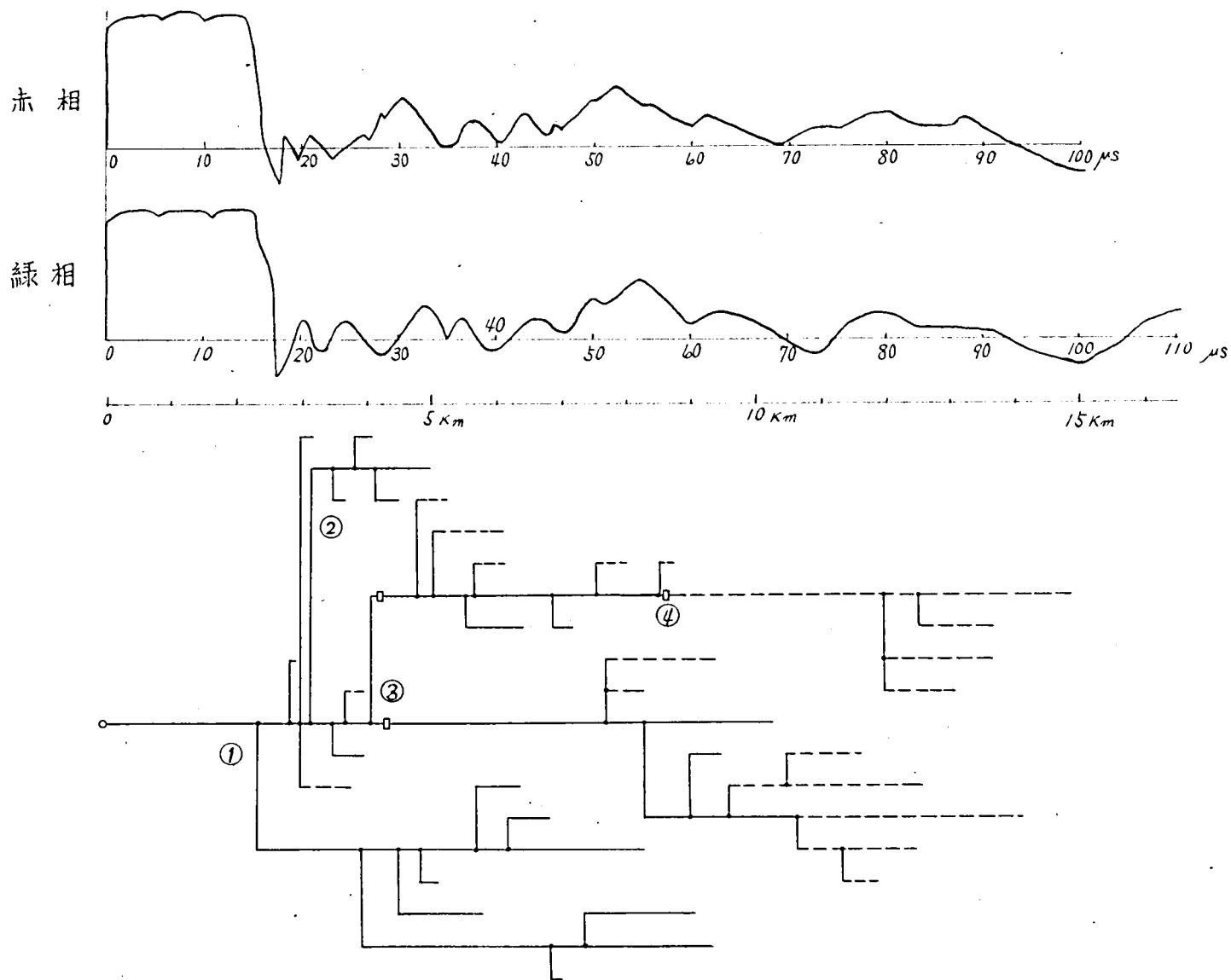
第3.42図 3KV 笠田動力線四郷分岐のみ残した場合の反射波

赤 相

録 相



第3.43図 3KV 笠田動力線全線の反射波



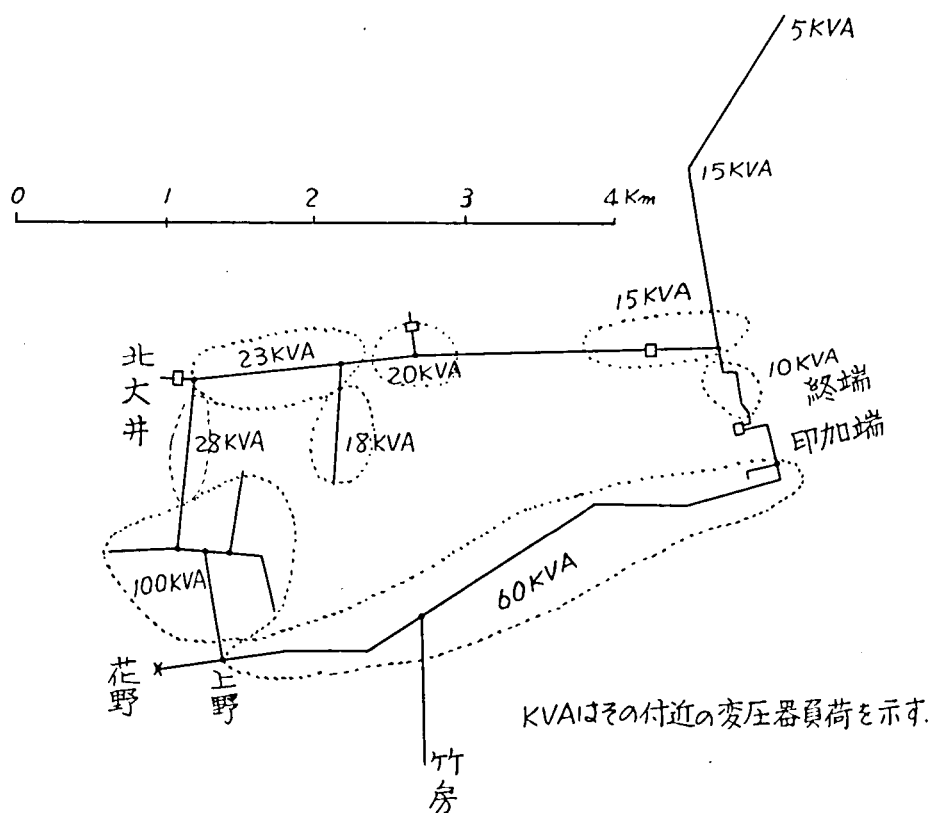
第 3.44 図 笠田動力線全線の反射波 (名手 50 号の分岐を名手 69 号に渡更せる場合)

第6節 環状に接続した3KV配電線における減衰および変歪の実測

3KV打田動力線を利用して第3.45図の如き印加端および終端が共に変電所にある長さ10.3kmの環状配電線をつくり、第2京大法によりインディシャルインピーダンスを測定すると同時に終端電圧を測定し、到来波の変歪状況を観察した。

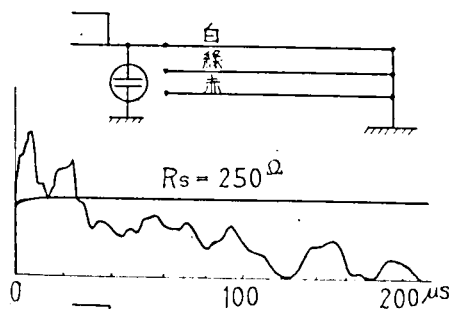
ただし打田下廻り線を印加端とし、打田上廻り線を終端とした。

測定は終端を開放、接地および主変圧器500KVA単相3台 Δ /1バンクの2次3KV側に接続した3つの場合について行った。その測定結果のオシログラムを第3.46～3.48図に示す。終端にあらわれる電圧は第3.6表のようになった。

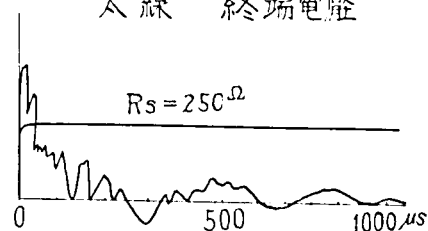


第3.45図 打田環状配電線系統図

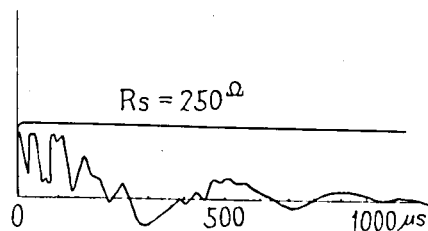
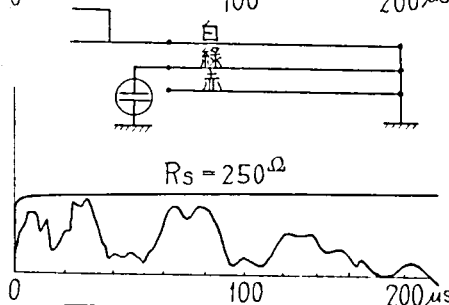
第3.46a圖



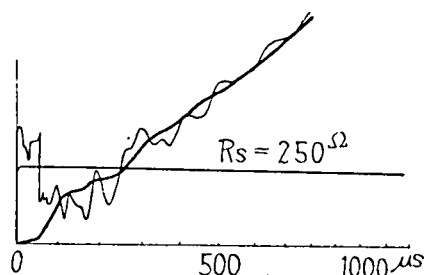
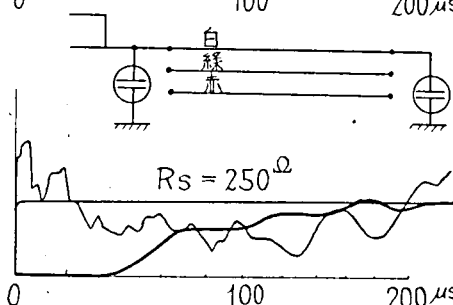
細線 印加端電壓
太線 終端電壓



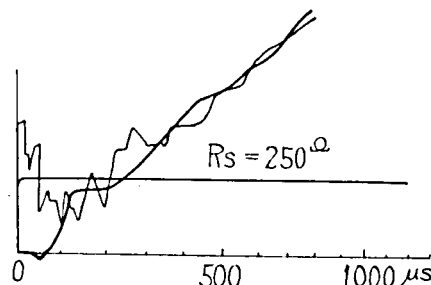
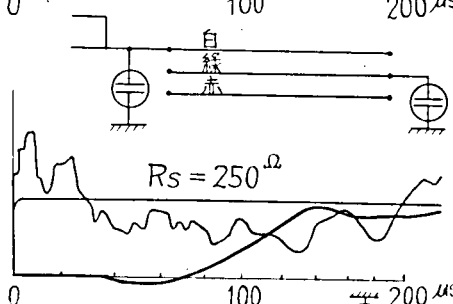
第3.46b圖



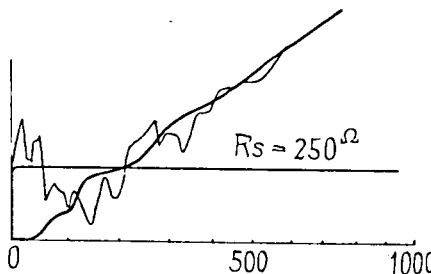
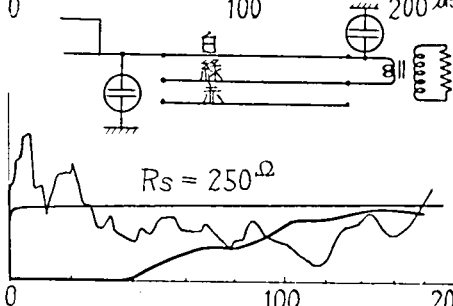
第3.47a圖



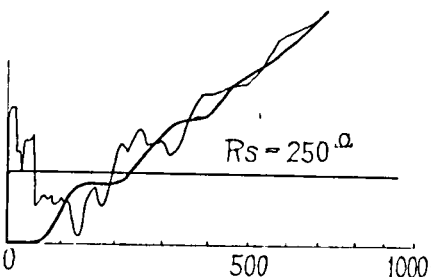
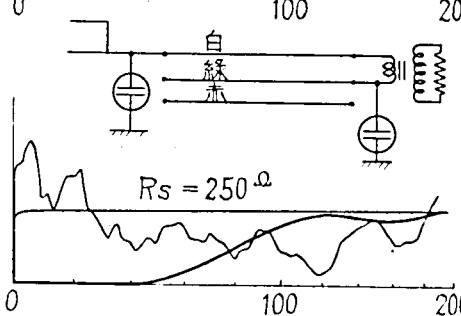
第3.47b圖



第3.48a圖



第3.48b圖



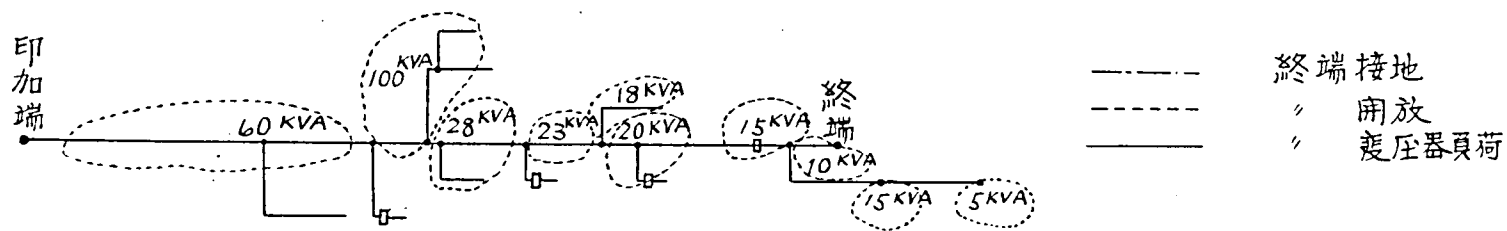
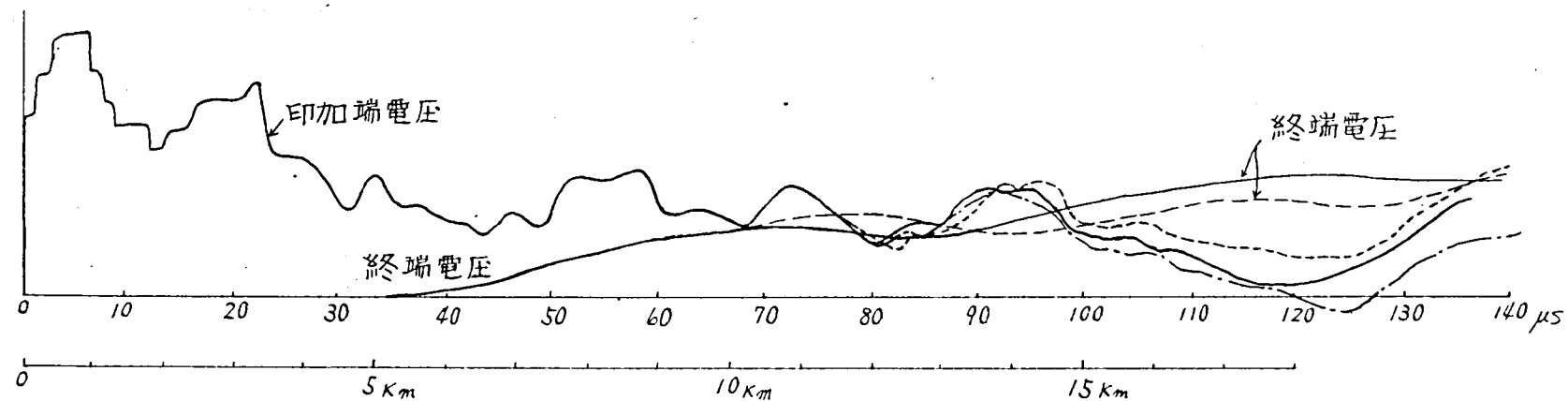
第3.6表 環状配電線における終端電圧 (矩形波印加)

	終 端 開 放		終端変圧器2次負荷	
	電圧印加相	電圧非印加相	電圧印加相	電圧非印加相
到達時間	40 μ s	40 μ s	40 μ s	40 μ s
波頭長	25 μ s	100 μ s (負電圧より始まる)	60 μ s	80 μ s
波頭高	0.355倍	0.45倍	0.184倍	0.5倍

以上3つの場合のインディシャルインピーダンスのオシログラムを同一図上に描けば第3.49図のようになる。終端の反射波が印加端に戻ってくる時刻までは、オシログラムは3つの場合共完全に一致する。それ以後の電圧波形は終端接地の場合の終端の反射波が最も低く、終端開放の場合の終端の反射波が最も高い。終端変圧器負荷の場合は、前2者の中間にあるが、どちらかといえば終端開放の場合に近い。

終端開放の場合の終端電圧は、電圧を印加した白相では(第3.47a図)終端に電圧を印加した後、約40 μ sの遅より $112(\text{V}/\mu\text{s}) \times t(\mu\text{s})$ の直線上に周期約120 μ sの小振巾の減衰振動が重畳した曲線に沿って上昇する。すなわち印加端に印加した約5 μ sの波頭長が10.3 km伝播することにより、25 μ sの波頭長となり、波頭電圧は0.355倍に減少してしまう。また電圧を印加しなかった緑相の終端電圧は(第3.47b図)電圧印加後約40 μ sを過して負電圧があらわれ、続いて $112(\text{V}/\mu\text{s}) \times t(\mu\text{s})$ の直線上に周期120 μ sの小振巾の減衰振動を重畳した曲線に沿って上昇する。このはじめの負電圧があらわれるのは第2種進行波の減衰および変歪が大きい一方、第1種進行波の減衰がかなり小さいので電圧非印加相では負の第1種進行波成分だけが先に到着するためである。その波頭長は100 μ sにもなり、波頭電圧は印加電圧の0.45倍に減少している。

次に終端に主変圧器2次巻線を接続せる場合の終端電圧中、電圧を印加した白相では(第3.48a図)電圧印加後約40 μ sの遅より、 $125(\text{V}/\mu\text{s}) \times t(\mu\text{s})$ の直線上に周期約180 μ sの小振巾の減衰振動が重畳した曲線に沿って上昇する。すなわち印加端に印加した約5 μ sの波頭長が10.3 kmの配電線を伝播



図中の KVA はその付近の変圧器負荷を示す。

第 3.49 図 打田環状配電線の反射波

することにより、電圧印加の時刻より $40 \mu s$ 遅れて到達し、波頭長は約 $60 \mu s$ となり、波頭電圧は 0.184 倍に減少してしまう。また電圧を印加しなかった緑相の終端にあらわれる電圧は（第3.48 b 図）、電圧印加後約 $40 \mu s$ より 125 $(\mu s / \mu s) \times t (\mu s)$ の直線上に周期約 $180 \mu s$ の小振幅の減衰振動が重畳した曲線に沿って上昇し、波頭電圧は 0.5 倍に減少する。すなわちこの場合は前と異なり、初期における第1種進行波による負電圧があらわれず、はじめより正電圧があらわれる。これは主変圧器を通じて結合されるためであろう。

主変圧器の2次巻線を終端に接続したことによる影響は非常に少ない。換言すれば変圧器の侵入容量により変歪される程急峻な波形は到達しなかったことを示す。

第 7 節 配電線上の衝撃電圧の減衰の実測

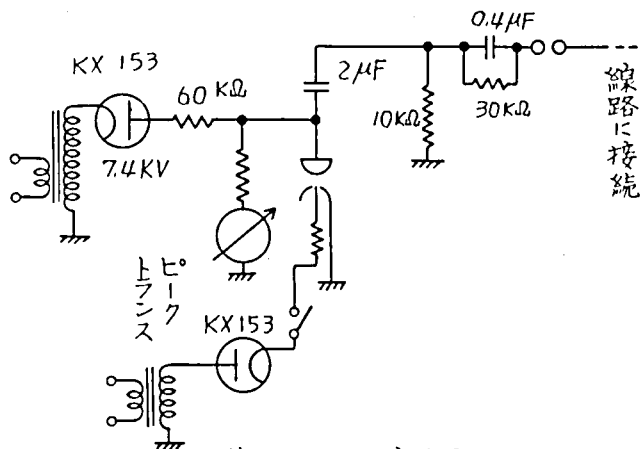
3 kV 笠田動力線の使用状態において、任意地点から短波尾長（波尾長約 $15 \mu\text{s}$ ）10 kV 衝撃電圧を印加し、各区間における減衰を求めた。

電圧印加に使用した衝撃電圧発生装置の回路は第 3.50 図のようなものを使用した。

衝撃電圧は活線に加えるため

電力周波数の続流が流れないように、衝撃電圧発生装置に直列に $C = 0.4 \mu\text{F}$, $R = 30 \text{ k}\Omega$ の並列回路と保護向隙を使用した。

線路のインピーダンスは既述のように甚だ複雑であるから、第 3.50 図に示した衝撃電圧発生装置の定数では単純な標準衝撃電圧波形（ $1 \times 40 \mu\text{s}$ ）を得ることはできなかった。



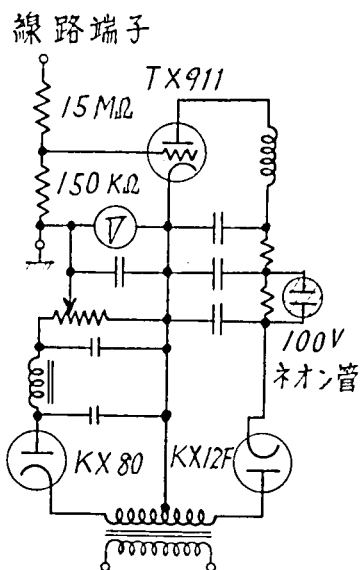
第 3.50 図 衝撃電圧発生装置回路

(1) 変電所母線に衝撃電圧を印加し、線路上で電圧測定をした場合の実測

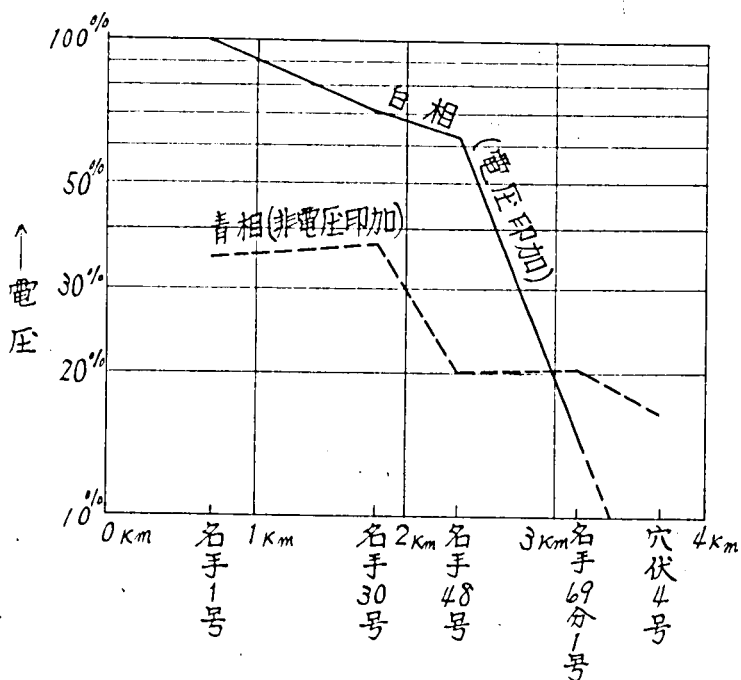
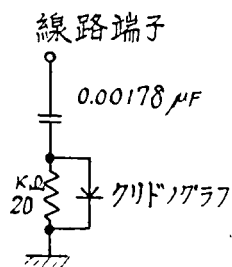
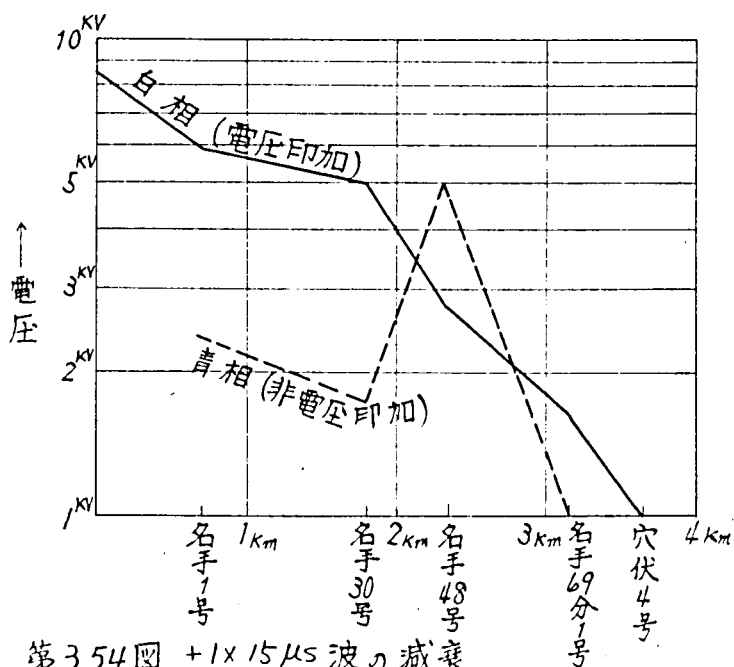
変電所 3 kV 母線に衝撃電圧を印加して付図 1 に示した名手 1 号柱、名手 30 号柱、名手 48 号柱、名手 69 分 1 号柱、穴伏 4 号柱に設置された避雷器の線路側端子と大地間にあられる衝撃電圧を、サイラトロン波高電圧計およびクリドノグラフにて測定した。波高電圧計は接続図第 3.51 図のようにサイラトロン TX 911 の放電開始電圧を利用したものである。

サイラトロン TX 911 の衝撃電圧による格子の起動特性および使用した抵抗分圧器については検討の余地があるが、クリドノグラフに比し直接その結果を読み取りうる点などは、この種の野外測定用として相当の利用価値あるものと思われる。測定結果を百分率にて示すと第 3.52 図のようになった。

クリドノグラフの線路への結合回路は第 3.53 図のようであり、その測定の結果は第 3.54 図のようになった。



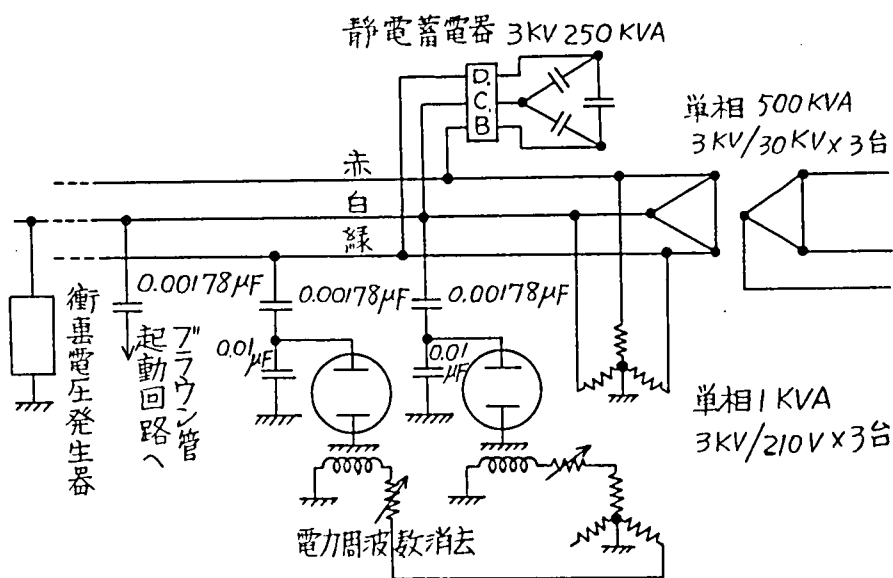
第3.51図 波高電圧計

第3.52図 $+1 \times 15 \mu s$ 波の減衰
(波高電圧計)第3.53図
クリッドグラフ 結合回路第3.54図 $+1 \times 15 \mu s$ 波の減衰
(クリッドグラフ)

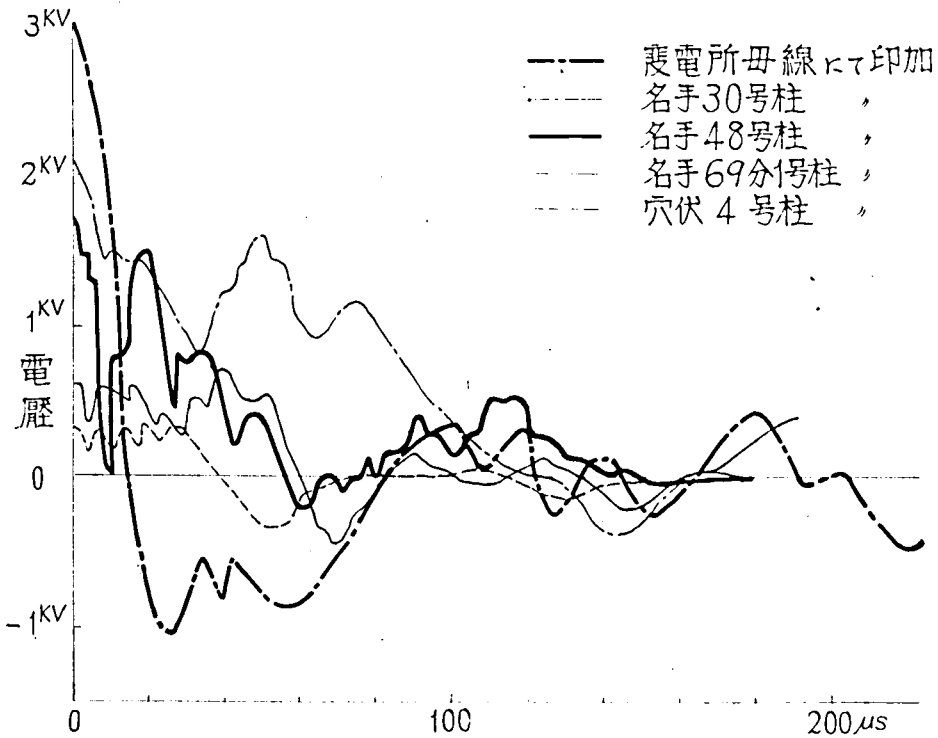
(2) 線路途中に衝電圧を印加し、変電所母線で電圧を測定した場合の実測

第(1)項と逆に名手30号、名手48号、名手69分1号、穴伏4号柱に設置された避雷器の線路端子と大地間に10KVの短波尾(波尾長 $15\mu s$)の衝電圧を印加して、3KV変電所母線に到来する電圧を高速変ブラウン管により測定した。その結合分圧回路として第3.55図の回路を使用した。変電所母線に静電蓄電器を接続しない場合、衝電圧を印加した白相にあらわれる電圧は第3.56a図の如く、電圧を印加しなかつた相の電圧は第3.56b図の如くだった。また変電所母線に静電蓄電器を接続した場合、衝電圧を印加した白相にあらわれる電圧は第3.57a図のようになり、電圧を印加しなかつた緑相にあらわれる電圧は第3.57b図のようであった。これらの電圧波形の最大電圧と変電所への距離の関係を第3.58図に示す。変電所母線の印加波形以外は、到来波により高速変ブラウン管を起動させたため、波頭部分を撮影できなかったものもある。

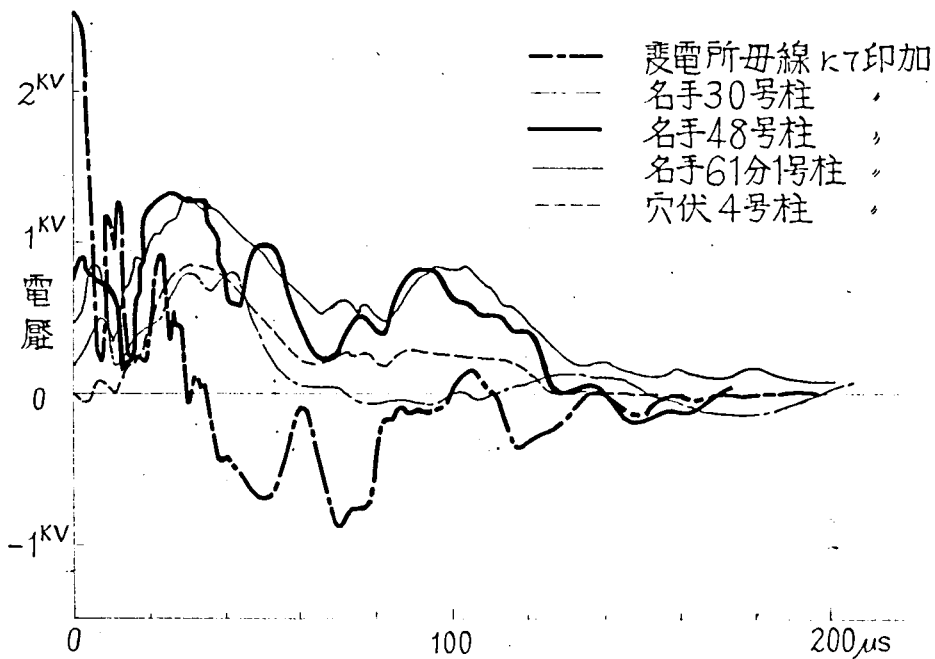
静電蓄電器なき場合、変電所母線にあらわれる電圧は相当高調波を含み、電圧を印加した相と電圧を印加しなかつた相のあいだには相当相異があるが、静電蓄電器が母線に接続されているときは、母線にあらわれる電圧は高調波が少なく、電圧印加相と非印加相の差異はほとんどみとめられない。



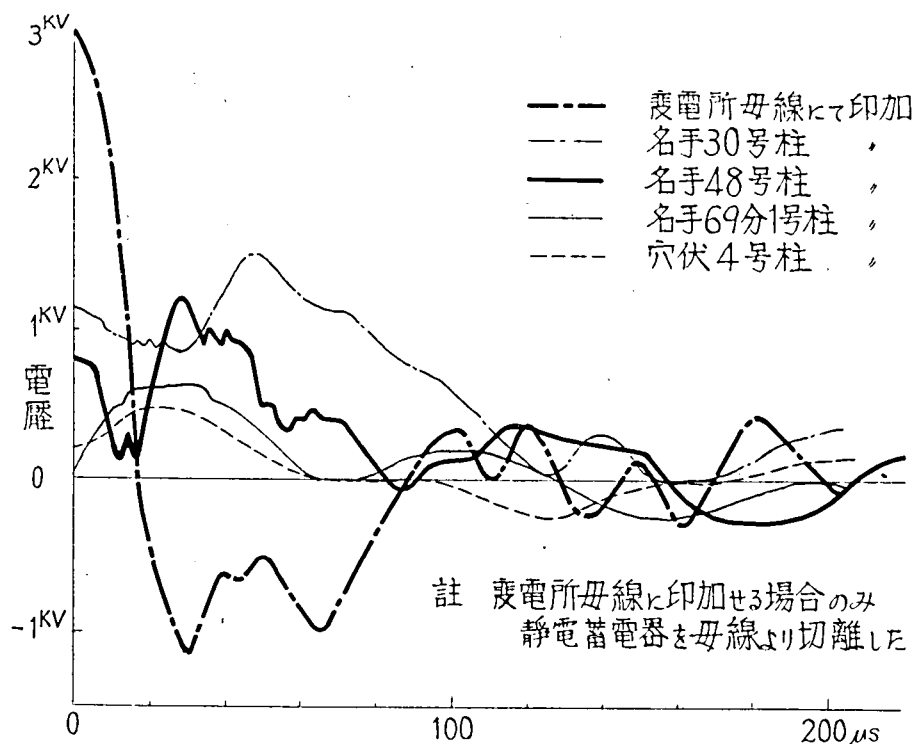
第3.55図 変電所における減衰測定回路



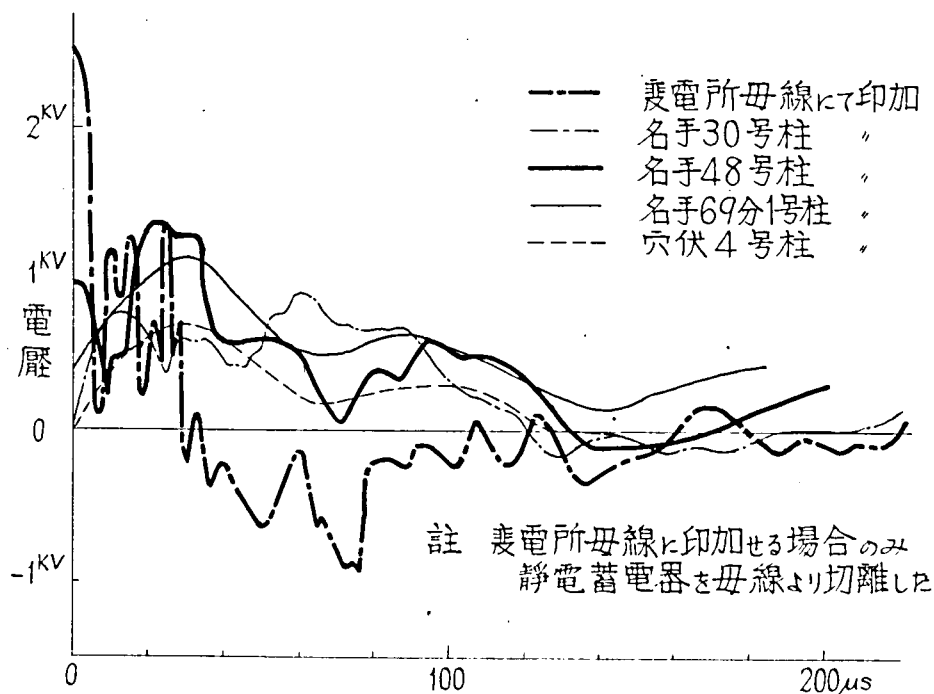
第3.56a圖 配電線路上にて衝浪電壓を印加した場合(静電蓄電器非接続)
変電所母線白相(電壓印加相)の電壓



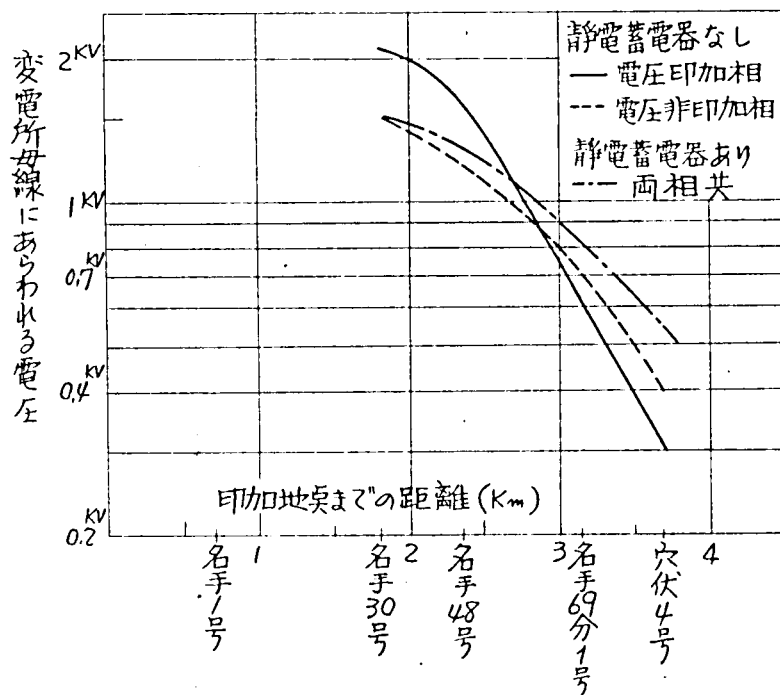
第3.56b圖 配電線路上にて衝浪電壓を印加した場合(静電蓄電器非接続)
変電所母線緑相(非印加相)の電壓



第3.57a圖 配電線路上にて衝電壓を印加した場合(静電蓄電器接続)
変電所母線白相(電壓印加相)の電壓



第3.57b圖 配電線路上にて衝電壓を印加した場合(静電蓄電器接続)
変電所母線緑相(非印加相)の電壓



第3.58図 $+1 \times 15 \mu s$ 波の減衰 (ブラウン管)

(3) 減衰係数およびこれに対する考察

以上の実測値より各電柱区間に対する減衰係数を求め、減衰係数 $= \varepsilon^{-\alpha l}$ (l = 電柱区間の距離 k_m) とおき、指数減衰係数 α を求めると第3.7表の結果となった。

第3.7表 波高電圧計、クリドノグラフ、ブラウン管による減衰の測定

	距離 k_m	変電所母線に衝撃電圧を加え 配電線上にて最大電圧を測定				配電線上に衝撃電圧を加え変 電所母線にてブラウン管にて測定			
		波高電圧計にて測定		クリドノグラフにて測定		母線に静電蓄電 器ある場合		母線に静電蓄 電器なき場合	
		減衰係 数 %	指数減 衰係数 α/k_m	減衰係 数 %	指数減 衰係数 α/k_m	減衰係 数 %	指数減 衰係数 α/k_m	減衰係 数 %	指数減 衰係数 α/k_m
変電所 - 名手1	0.7	/	/	70.6	0.5	/	/	/	/
名手1 - 名手30	1.1	68.5	0.348	83	0.168	/	/	/	/
名手30 - 名手48	0.55	79.6	0.458	56	1.07	80	0.48	80	0.48
名手48 - 名手69分1	0.8	23.5	1.82	57	0.7	58	0.68	35.6	1.3
名手69分1 - 穴伏4	0.55	/	/	/	/	57	1.01	50	1.45

線路に分岐および変圧器負荷のない変電所名手48号柱までの区間では指数減衰係数は約 $0.5/km$ となり、分岐および変圧器負荷のある名手48号柱以後では指数減衰係数は約 $1/km$ となる。

第2京大法によるインディシャルインピーダンスのオシログラム中の第1反射波と原波の比より指数減衰係数を求めた結果を第3.8表に再記する。

第3.8表 第2京大法により求めた指数減衰係数 α

	3線一括対大地	1線対他線接地	1線対大地間
30KV粉河-笠木向木柱送電線17.5km先端開放	$0.0055/km$	$0.00815/km$	$0.0127/km$
3KV笠田動力線名手50号柱2.3kmにて先端開放	$0.031/km$	$0.0123/km$	$0.0123/km$

前述の如く第3.56 a, b 図に示すような短波尾長(約 $15\mu s$)の衝電圧を配電線路に印加して減衰を測定した場合、分岐および変圧器なき部分の指数減衰係数は約 $0.5/km$ 、分岐および変圧器負荷の分布している場合の指数減衰係数は約 $1/km$ であった。これに対して第2京大法により矩形波に対して求めた指数減衰係数は $0.0123/km$ であった。これらはそれぞれ1km進行後に61%、37%および99%に減衰することに相当する。このような減衰の見掛け上の相違は、本節に示すような短波尾衝電圧波は配電線上の減衰および変歪がいちじるしく、最大値がすみやかに減少するためであると考えられる。

これらの減衰係数を使用して距離と減衰との関係を示すと第3.59図のようになる。

第3.59図で直線①および曲線④は矩形波に対して第2京大法より求めたもので、直線①は3線一括の場合についての減衰である。曲線④は1線に電圧を印加した場合についてのものであり、この印加波を第3.36図と同様に0.473倍の第1種進行波と0.526倍の第2種進行波に分けると、第1種進行波の減衰は曲線② すなわち $0.473e^{-\alpha l}$ ($\alpha=0.01$) となり、

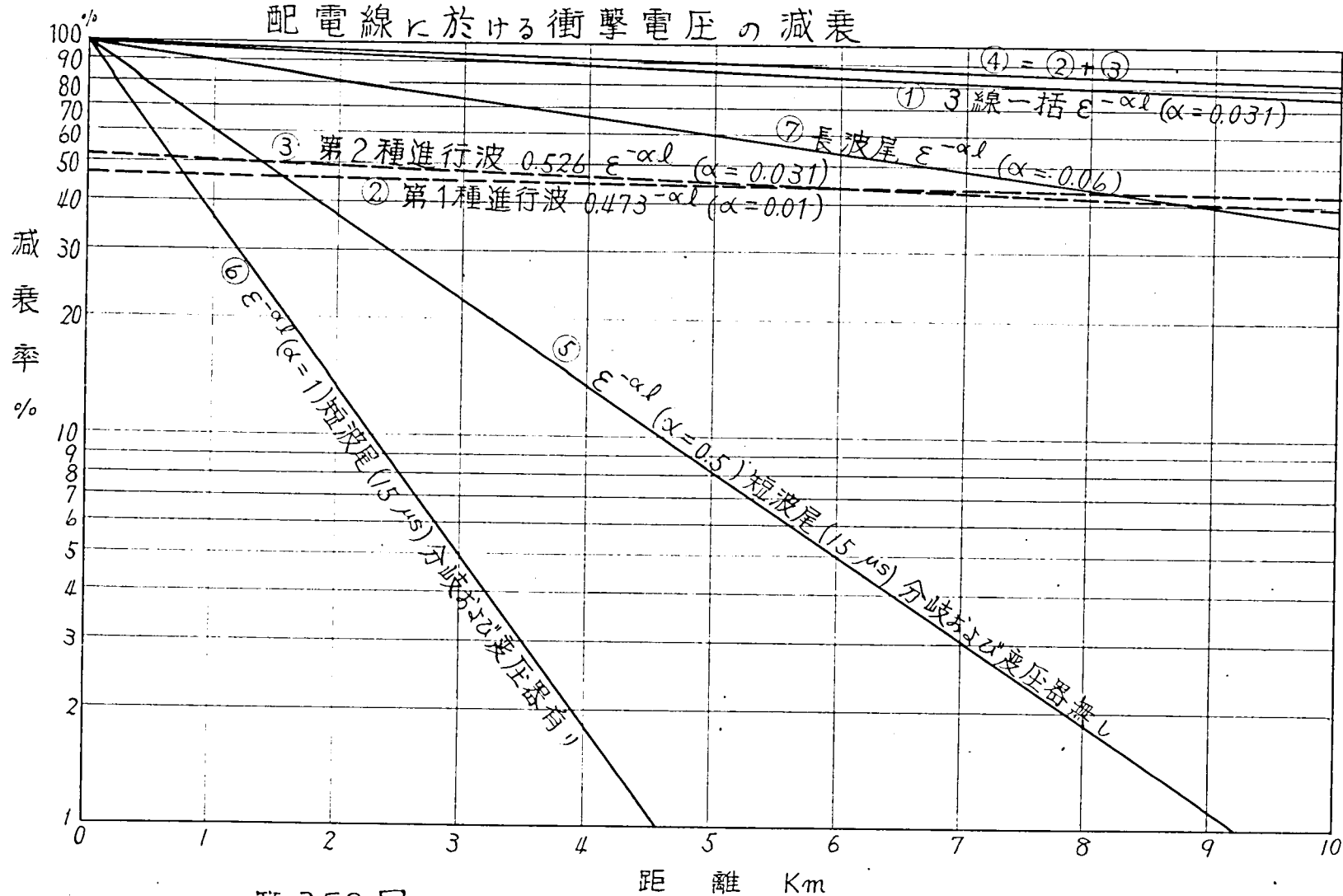
第2種進行波の減衰は曲線③ $0.526e^{-\alpha l}$ ($\alpha = 0.031$) となる。この2者②と③を加えたものが1線に電圧を印加した場合の減衰を示す曲線④となる。曲線⑤および⑥は線路に短波尾(波尾長約 $15\mu s$)の衝撃電圧波を加えて得た減衰の値であつて、⑤は線路に分岐および変圧器なき部分に対するもの、⑥は線路に分岐および変圧器が分布している部分に対するものである。⑦は打田環状配電線のサージ特性測定をしたときの受電端電圧より長波尾の場合について求めたものである。

直垂雷に比べて矩形波で波尾の長い場合には分岐および変圧器負荷のない部分(曲線④)では 7.5 km 伝播して 80% に減衰し、分岐および変圧器負荷のある部分(曲線⑦)では 3.5 km 伝播することにより 70% に減衰する。

これに対して短波尾長(約 $15\mu s$)の波に対しては、分岐および変圧器負荷なき部分(曲線⑤)にて 0.7 km 伝播することにより 70% に減衰し、分岐および変圧器負荷のある場合(曲線⑥)にて 0.35 km 伝播すると 70% に減衰する。

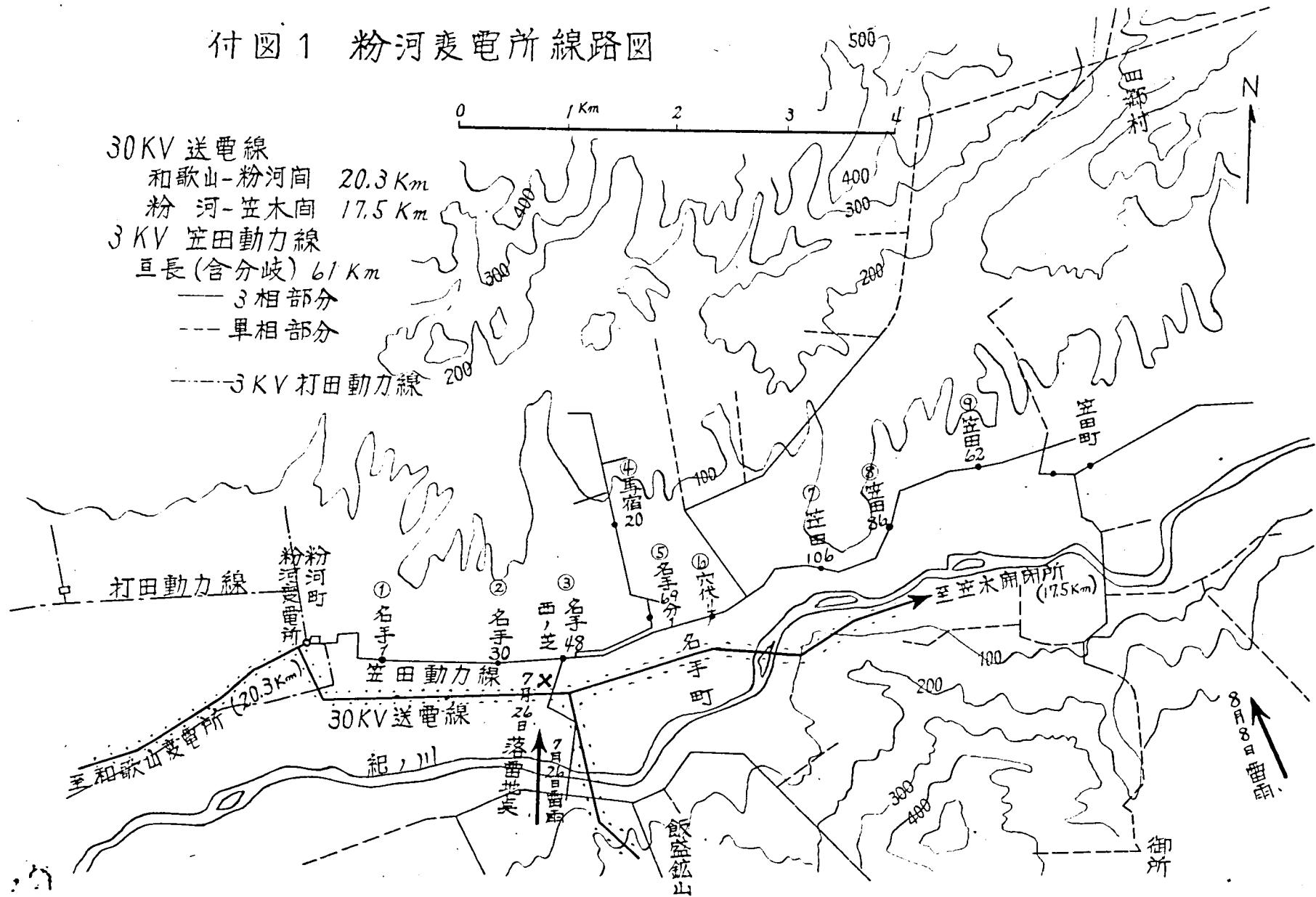
すなわち普通の配電線では相当短距離で衝撃電圧は減衰するものと考えて差支えなからう。

配電線に於ける衝撃電圧の減衰



第 3.59 図

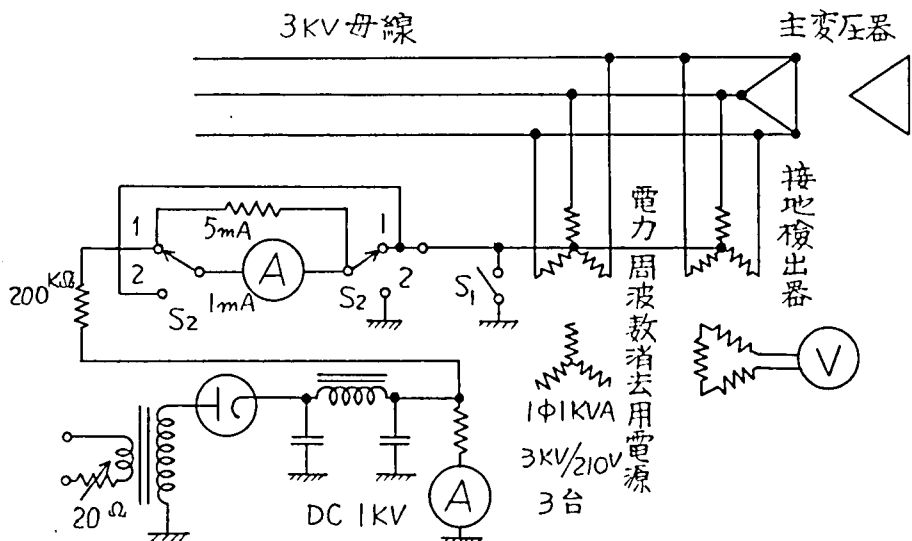
付図1 粉河変電所線路図



第 8 節 3KV配電線の絶縁抵抗の実測

線路の進行波特性、ことにその減衰変歪を知るためには、その絶縁抵抗を知ることにも必要である。

3KV配電線路の大地に対する絶縁抵抗および使用状態における直流分を測定するために、第3.60図の如く変電所3KV母線に1次星型に接続した接地検出用変圧器の1次中性点と大地間に直流電源1000V、直列抵抗200K Ω および5mAの電流計を直列に入れて絶縁抵抗を測り、また1mAの直流電流計のみを挿入して使用状態における漏洩直流分を測定した。第3.60図において運転状態では開閉器 S_1 を閉じているが、絶縁抵抗を測定するには開閉器 S_1 を開き開閉器 S_2 を1に倒して電流計の振れを読む。測定結果を第3.9表に示す。



第3.60図 絶縁抵抗および直流分測定装置

第3.9表 配電線路絶縁抵抗の記録

日 時	天候	測定線路	直流分 mA	DC 1KVによる 絶縁抵抗 mA	KΩ	500Vメガ- による絶縁 抵抗 KΩ	備 考
8月5日	晴	3KV母線	0.2~0.1	0.92	17	運転状態	
8月5日12時	〃		0.4~0.6	0.9	20		
8月5日17時	〃		0.2	0.95	11		
8月9日	〃		0.2~0.6	0.95	11		
8月10日14時	〃		0.1	0.96	9		
8月10日16時	雨		0.4	0.99	2		
8月12日	〃		0.6	0.95	11		
8月17日	〃		0.2	0.92	7		
8月6日	〃	笠田3線一括		0.73	70	60 KΩ	線路のみ 巨長 61km 分岐変圧器 あり km 当り 3.7MΩ となる。
		赤相1線		0.8	50	60 "	
		白相1線		0.76	66	60 "	
		緑相1線		0.76	66	60 "	
8月11日12時	〃	笠田名手50号柱まで 3線一括				3 MΩ	単純線路2.41km 分岐変圧器なし km 当り 7.5 MΩ となる。
		赤相1線				5 "	
		白相1線				11 "	
		緑相1線				8 "	

運転状態における3KV系統線路の大地に対する絶縁抵抗は3線一括60KΩであつて、1km当り3.7MΩとなつた。単純な分岐および変圧器負荷のない配電線では3線一括1km当り7.5MΩであつた。

1線対大地間および各線相互間の漏洩は柱上変圧器があるため測定できなかったが、その値はさらに小さいはずである。全体の漏洩電力損失は雨天では10KW以上になるであらう。

第 9 節 結 言

送配電線のインデューシャルインピーダンスを測定し、整理検討して次の結果を得た。このうち(3)(4)(5)項は特に注目すべき成果である。

- (1) 30KV木柱3相送電線のサージインピーダンスの実測値は、線路構造より計算した値と良く一致し、3線一括270Ω, 1線対他線接地間440Ω, 1線対大地間510Ωであった。
- (2) 3KV3相配電線のサージインピーダンスの実測値は、線路構造より計算した値とは全然異った値となり、並架線路を大地として考慮した計算値に近くなる。その値は3線一括対大地間で200Ω, 1線対他線接地間で380Ω, 1線対大地間で420Ωであった。
- (3) 単純なる線路の上の反射、減衰、変歪の現象は、導体相互間を帰路としている第1種進行波と、すべての導体で同一大きさであって大地を帰路とする第2種進行波とに分けて、それぞれ別々に反射、減衰、変歪を考えて後、合成すれば進行波の伝播現象を精密に解析できることを新しく実証した。
- (4) 線路が各相につき平衡している、すべてにおいて対称である場合は反射、減衰、変歪をうけた後も第1種進行波は第1種進行波のままで第2種進行波を生ずることなく、第2種進行波からも第1種進行波を生ずることがない。すなわち第1種進行波、第2種進行波はそれぞれ単独に伝播現象を考えて後、合成して差支えないことが明らかになった。
- (5) 一般に接地抵抗は複雑な衝電圧特性をもっているので、線路の接地点における反射は非常に複雑なものとなる。
- (6) 1個の分岐でも複雑な数回にわたる往復反射をすることを実測し、一方そ

の反射透過現象の格子図を描き両者の一致することを示した。

(7) 3相線路の途中に接続されている1個の単相柱上変圧器は2線間の小さな静電容量としてはたつき、負の反射波の小さな *dip* を示す。この場合変圧器の接続されていない線ではその *dip* は非常に少ない。

(8) 配電線路は一般に複雑な分岐をもっているので送電端にあらわれる反射波はどれがどの分岐または変圧器の反射であるか判別はむづかしい。ただ送電端より一番はじめにある分岐あるいは変圧器等は明瞭に判別することができる。また分岐の終端反射が同時刻に送電端にもどって来るような線路の長さになっていると、その正反射が合成されて大きくでる。

(9) 分岐および変圧器負荷のない単純な配電線路では、進行波の伝播する距離を l km とすると、第1種進行波の減衰は小さく $\varepsilon^{-0.01l}$ に従って減衰し、第2種進行波の減衰はかなり大きく $\varepsilon^{-0.031l}$ に従って減衰する。

しかし接地抵抗による反射は非常に複雑であつて、終端接地の場合には変圧器が大きいので減衰のみを分離して求めることはできないことがわかった。

(10) 分岐および変圧器負荷ある配電線路では、印加端、終端の電圧を比較することにより1線に矩形波を印加したとき距離 l km 伝播すると、 $\varepsilon^{-0.06l}$ に従って電圧が減少することを知った。

(11) 短波尾長（波尾長約 $15\mu s$ ）の衝電圧は分岐および変圧器負荷なき配電線路上では $\varepsilon^{-0.5l}$ に従って減衰し、分岐および変圧器負荷のある配電線路上では ε^{-1l} に従って減衰することを知った。（ただし l は伝播距離 km）

(12) 亘長 10.3 km の環状配電線の終端を観察すると、印加端にて $5\mu s$ の波頭長は終端の電圧印加相で $25 \sim 30\mu s$ 程度となる。ことに電圧を印加しなかつた相では波頭長 $100\mu s$ ともなり、初期において微弱であるが逆極

性の電圧があらわれる。これは第2種進行波がいちじるしく減衰、変歪して、遅れて到達することを示している。

- (13) 配電線路の絶縁抵抗は全系統3線一括晴天時 $20 \sim 10 \text{ k}\Omega$, 降雨時 $2 \text{ k}\Omega$ であった。普通の配電線路(変圧器負荷等あるもの)の絶縁抵抗は $3.7 \text{ M}\Omega/\text{km}$ であり、変圧器負荷の接続されていない単純な配電線の絶縁抵抗は3線一括で約 $7.5 \text{ M}\Omega/\text{km}$ であった。

総 括

本文を終るにあたり第1章～第3章において筆者の行った研究ならびにその成果を以下に概括しておく。

第1章 変圧器の過渡特性

変圧器の実例として 10KVA 6KV/210V 単相配電用巻鉄心変圧器, 150KVA 6KV/3KV 単相外鉄型絶縁変圧器, 500KVA 30KV/3KV 単相外鉄型電力用変圧器, 10,000KVA 30KV Δ /6KV Δ 3相内鉄型電力用変圧器の各種接続に対して、第2京大法によりインデシヤル・インピーダンスを求め、その等価回路を明らかにした。また同時に上記変圧器の各接続について内部電位振動を測定し、これらのデータを検討して次の成果を得た。

- (1) 巻線長がかなり長い変圧器のインデシヤル・インピーダンスには振動性または対数的性質となる時間の前に、巻線のサージ・インピーダンスを示す部分がある。この時期を全過した以後は、集中定数回路と考えて差支えない。このインデシヤル・インピーダンスがサージ・インピーダンスを示している期間についていえば、巻線構造が均一な分布配置で巻線長が長いほどこの期間が長い。
- (2) 巻線構造を2群に分けて考え得る変圧器について、過渡時の電圧電流の振動を考察するにあたり、集中定数回路として取扱う数式を求めた。この計算式は特に小容量の柱上配電用変圧器の如く、明らかに2つの単位コイルの両端に静電容量が集中している構造の巻線の振動については非常に良く適合することがわかった。
- (3) 50KVA 配電用積鉄心変圧器の1次巻線を構成する単位コイルのインデシヤル・インピーダンスおよび各単位コイル間の結合インピーダンスを測定し、その巻線の等価回路を求めた。その結果として各単位コイル間の結合インピーダンス、すなわち相互誘導および静電誘導はかなり大きいことを知った。

第2章 変圧器を接続した模擬送電線の過渡特性

絶縁棒の上に絹巻銅線を一重のソレノイドに巻き、その上に銅板を長く添わせ、これを銅パイプに入れた単位を直列に接続した模擬送電線に、10KVA 6KV/210V配電用巻鉄心変圧器あるいは150KVA 6KV/3KV絶縁変圧器の2次巻線を、1個あるいは数個分布させて接続し、この過渡特性を第2京大法により測定して次の成果を得た。

- (1) 送電線終端の線間に変圧器を接続した場合、変圧器は第2京大法で求めたインデイシャル・インピーダンスをもつ C_t , L_t , R_t の並列回路と考えて、線路中の往復反射現象の計算式を導いた。その計算式に各定数を入れた結果は実測と非常に良く合った。
- (2) 送電線の終端で線間に変圧器を接続するとき、時間全過後の振動は送電線の全静電容量 C_0 を集中定数と考へ、これと変圧器の等価並列インダクタンス L_t および等価並列抵抗 R_t との共振回路によつて、その振動周波数および波高値が定る。これを示す近似式を導き各定数を入れると実測値と大体合う結果を得た。

第3章 送配電線の進行波特性

実際の送配電線として、30KV木柱送電線について、また配電線の単純な場合、ならびに普通の分岐および配電用変圧器の分布している場合について、第2京大法でインデイシャル・インピーダンスを測定し、あるいは線路上における減衰を測定して次の結果を得た。

- (1) 単純なる線路上の反射、減衰、変歪の現象は、導体相互間を帰路としてゐる第1種進行波と、すべての導体で同一大きさであつて大地を帰路とする第2種進行波とに分けて、それぞれ別々に反射、減衰、変歪を考へて後合成すれば進行波の伝播現象を精密に解析できることを実証した。
- (2) 大地を帰路とする第2種進行波の減衰および変歪は第1種進行波に比していちじるしく大であることを知つた。
- (3) 一般に接地抵抗は複雑な街電圧特性をもつてゐるので、線路の接地点における反射は非常に複雑なものとなることを示した。

- (4) 分岐あるいは配電用変圧器が複雑に分布している配電線では、第1番目にあるものは明瞭にその反射波を観察できるが、それ以外のものについては、反射波を識別することは難しく、第1章、第2章における如き解析は困難であり、データを定性的に考察するに止めた。

謝

辞

本研究は、終始京都大学林重憲教授の御懇篤なる御指導と御鞭達の下に行なわれた。ここに記して衷心より感謝の意を捧げるものである。また本研究遂行上、第1章、第2章に關しては、大阪変圧器株式会社毛利部長、文石課長、文矢知係長、小野正登、森 進の諸氏より幾多の御教示、御援助を賜った。また第3章に關しては昭和23年および昭和24年夏期電気学会雷突測委員会関西分科会の各委員の御援助によつて行なつたもので、特に便宜を与えられた関西電力株式会社技術研究所、本店、滋賀支店、和歌山支店の各位および大阪変圧器株式会社長谷川溶接機事業部次長（当時研究課長）、泉課長に御教示、御援助を賜った。なお第2章の模擬送電線は大阪大学山村豊教授の研究室にあるものを使用させて頂いた。ここに深甚なる謝意をささげる。

文 献

- (1) L. V. Bewley ; Travelling Waves on Transmission System
- (2) Shigenori Hayashi ; Surges on Transmission Systems
- (3) 林 演算子法解説
- (4) 林 過渡現象と演算子法
- (5) British Electrical and Industrial Research Association ;
Surge Phenomena
- (6) 岩本 進行波とその計算入門
- (7) E. Beck ; A Travelling Wave Primer AIEE Lightning Ref. Book
- (8) 門田 演算子法入門
- (9) 黒川 電気回路過渡現象論
- (10) 額田 電気過渡現象論
- (11) 林, 岩本, インデシヤル・インピーダンス並びに 電気評論 昭25.9
インピーダンス関数の測定法とその応用 " 昭25.10.11
- (12) 美彌 送電線の進行波特性 東芝技報 昭18
- (13) 林 単相送電線に沿う進行波の発生, 反射 電気評論 昭25.10
並びに透過現象の簡易計算法 " 昭25.11-12
- (14) 林 多相送電線の進行波に対する考え方 電気評論 昭24.10.11
昭25.3~9
- (15) 長谷川 送電線の衝突電圧特性について 連 大 昭25.4
小南, 泉
- (16) " 3000V 配電線の襲雷による接地現象 連 大 昭25.4
- (17) 大阪変圧器 刊 関西配電株式会社粉河変電所における
雷害および線路の衝突電圧特性実測報告
- (18) 山村, 岡, 変電所の衝突電圧分布とサーシ模擬計算盤 電学誌 昭33.2

- (19) 宮本 変圧器の内部電位振動 芝浦電機 昭14. 6~8
- (20) 法貴 変圧器の線端コイルにおける Stress 電試彙 昭16. 9
- (21) 法貴 変圧器の内部電位振動の減衰 電試彙 昭17. 1
- (22) 法貴 変圧器の過渡インピーダンス 電試彙 昭17. 6
- (23) 法貴 変圧器の軸方向ストレス 電試彙 昭17. 11
- (24) 木村 衝撃電圧波形直視装置による変圧器電位
振動と共振法による変圧器定数との関係 三菱電機 昭17.
- (25) 毛利 衝撃電圧と変圧器 昭27.
- (26) 林、西田 変圧器巻線の異常過渡特性 京大研彙 昭28. 3
- (27) M. Weed ; Abnormal Voltages in Transformers AIEE 1915
- (28) K. W. Wagner ; Wanderwellen - Schwingungen in
Transformatorwicklungen Arch. f. Ele. 1918
- (29) Rogowski ; Spulen und Wanderwellen 1. Einschaltungsspannungen
der Spulen aus zwei Windungen Arch. f. Ele. 1918
- (30) Blume & Boyajan ; Abnormal voltage within
Transformers AIEE 1919
- (31) Brand & Palueff ; Lightning Studies of Transformers by the
Cathode Ray Oscillograph T. of. AIEE 1929
- (32) Palueff & Hagenguth ; Effect of Transient Voltages on
Power Transformer Design T. of. AIEE 1932
- (33) R. Elsner ; Neuere Untersuchungen zur Frage der
Stossbeanspruchung von Transformatoren Arch. f. Ele. 1936
- (34) Miller & Thomson ; The Surge Protection of Power Transformers JIEE 1937
- (35) Allibone, McKenzie, Perry ; The Effects of Impulse Voltages
on Transformer Windings JIEE 1937
- (36) R. Elsner ; zur Theorie des Schwingungsfreien
Drehstrom Transformatoren Siemens - werke 1939
- (37) Thomas ; Insulation Stress in Transformers.
with Special Reference to Surges and Electrostatic shielding
JIEE 1940